



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE



Université de Sherbrooke, Québec, Canada

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le  
développement  
(CIRAD)

***Étude du potentiel de déplacement du criquet nomade  
entre 1986 et 2004 réalisée à partir d'images satellite  
SPOT***

***Bassin de la Sofia (Madagascar)***

Par  
David LECLAIR

Stage au baccalauréat en géomatique appliquée à l'environnement

Réalisé à la Maison de la Télédétection (Montpellier – France)  
Du 2 mai au 31 août 2006

Co-encadrants : Alex FRANC et Valérie SOTI

Décembre 2006

## **Avant Propos**

Ce document est le fruit d'un travail de géo-traitement réalisé par David Leclair dans les laboratoires du CIRAD à la Maison de la Télédétection.

La première version de ce document a été rédigée par l'auteur, David Leclair. Elle a ensuite été profondément remaniée par ses 2 co-encadrants pour aboutir à la version présentée ici.

## Résumé

Les récentes pullulations du criquet nomade *Nomadacris septemfasciata* (Serville, 1838) observées de 2000 à 2003 dans le bassin de la Sofia à Madagascar ont engendré des ravages importants sur l'agriculture. Le criquet nomade a atteint la phase grégaire pour la première fois dans cette zone en 2002. Cette transformation phasaire sans précédent laisse à penser que des conditions environnementales ont récemment changé. L'évolution du couvert végétal, lié à la déforestation serait un facteur déterminant et aurait des conséquences sur la multiplication des populations acridiennes et leur regroupement par migration. La disparition de la forêt, barrière naturelle aux migrations du criquet, favoriserait donc les déplacements. Pour répondre à cette hypothèse, la télédétection est utilisée pour réaliser une étude diachronique à partir de 2 images SPOT (programme ISIS® CNES) obtenues en 1986 et 2004 au nord-est du bassin de la Sofia. Les traitements numériques des images ont permis d'identifier et de cartographier les biotopes acridiens pour les deux dates. L'évolution du couvert végétal met en évidence une déforestation et une fragmentation des biotopes importantes notamment à l'intérieur de la réserve forestière de Bora. De nouvelles voies privilégiées de déplacement du criquet nomade ont été ouvertes donnant ainsi accès à des sites potentiels de ponte auparavant inaccessibles.

## Abstract

The recent upsurges of the red locust *Nomadacris septemfasciata* (Serville, 1838) observed between 2000 and 2003 in the Sofia watershed in Madagascar have caused important damages to agriculture. The red locust reached the gregarious phase for the first time in this area in 2002. Alteration of environmental conditions could lead to this unprecedented phase transformation. The evolution of the land cover due to the deforestation may be a decisive factor and would have consequences on the increase of locust populations and their crowding by migration. The fragmentation and the disappearance of forest, which is an obstacle for the locust migrations, would increase the migrations. To answer this question, remote sensing was used to detect the change of land cover between 1986 and 2004 with 2 SPOT images (ISIS® CNES program) centred in the northeast of the Sofia watershed. The evolution of land cover shows a large deforestation and fragmentation of the habitats, especially in the Bora forest. New privileged displacement routes have been opened giving access to formerly inaccessible areas that may be favourable for the red locust reproduction.

### Références bibliographiques du document :

**Leclair, David.** 2006. *Étude du potentiel de déplacement du criquet nomade entre 1986 et 2004 réalisée à partir d'images satellite SPOT - Bassin de la Sofia (Madagascar).* Rapport de Stage au baccalauréat en géomatique appliquée à l'environnement (Université de Sherbrooke). CIRAD : Montpellier (France). 54 p.



## Remerciements

Je tiens sincèrement à remercier mon maître de stage, Alex Franc, pour m'avoir donné la possibilité de réaliser ce stage au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). Ce dernier a fait preuve d'une très grande générosité pour partager ses connaissances sur le criquet et sur ce fascinant pays qu'est Madagascar. De plus, il serait difficile de ne pas souligner son chaleureux accueil et sa précieuse collaboration à rendre mon séjour en France des plus agréables.

Également, j'aimerais mentionner l'important soutien technique que m'a apporté Valérie Soti tout au long de mon stage. Valérie Soti, mon encadrante, s'est avérée une référence pour répondre à mes questions relatives à la télédétection, elle a assuré un suivi de mon stage, notamment en m'assistant dans la planification d'un plan de travail et en veillant au respect des échéanciers des différentes étapes.

J'aimerais remercier Monsieur Vianney Houllès pour sa contribution à la rédaction de ce rapport.

J'aimerais aussi dire « merci » à tous les stagiaires et employés de la Maison de la Télédétection (MTD) qui, par leur entraide, leur dynamisme et surtout leur jovialité, ont créé un environnement de travail attachant.

Enfin, merci à l'Office franco-québécoise de la jeunesse (OFQJ) et à la Fondation Paul Desmarais pour leur contribution financière, qui a rendu possible l'accomplissement de ce stage à Montpellier.

# Table des matières

Introduction .....	8
1. Contexte et problématique de l'étude .....	9
1.1. Le criquet nomade .....	9
1.1.1. Biologie .....	9
1.1.2. Polymorphisme phasaire .....	9
1.1.3. Migrations .....	10
1.2. Présentation de la zone d'étude .....	11
1.2.1. Madagascar .....	11
1.2.2. Le bassin de Sofia .....	12
1.3. Objectifs et méthode .....	13
1.3.1. Objectifs .....	13
1.3.2. Méthode générale .....	14
2. Préparation des données .....	16
2.1. Choix des données .....	16
2.1.1. Description des données .....	16
2.1.2. Les contraintes .....	17
2.1.3. Les données retenues .....	17
2.2. Correction géométrique et ré-échantillonnage .....	18
2.2.1. Préparation de l'image de référence .....	18
2.2.2. Calage des autres images par rapport à l'image de référence .....	18
2.2.3. Résultats .....	19
2.2.4. Rééchantillonnage .....	20
2.3. Extraction du réseau hydrographique .....	20
2.4. Modèle numérique d'altitude (MNA) .....	21
3. Cartographie du potentiel de déplacement .....	22
3.1. Choix de la méthode de télédétection du changement .....	22
3.2. Classifications des biotopes acridiens .....	23
3.2.1. Choix de la méthode de classification .....	23
3.2.2. Détermination des classes .....	23
3.2.3. Sélection des sites d'entraînement .....	24
3.2.4. Création des signatures .....	25
3.2.5. Choix des bandes spectrales .....	25
3.3. Détermination des voies de déplacement privilégiées et de leur évolution .....	27
3.3.1. Potentiel de déplacement selon la végétation et le relief .....	27
3.3.2. Rôle du réseau hydrographique .....	28
3.3.3. Voies privilégiées de déplacement .....	29
4. Résultats .....	30
4.1. Biotopes acridiens .....	30
4.1.1. Qualité des classifications .....	30
4.1.2. Analyse des classifications .....	31
4.2. Évolution du potentiel de déplacement .....	38
4.3. Évolution du rôle du réseau hydrographique .....	38
4.4. Les nouvelles voies privilégiées de déplacement .....	41
5. Discussion .....	43
Conclusion .....	43
Références .....	45

Annexes .....	47
Annexe 1 – Images SPOT originales sélectionnées .....	48
Image SPOT originale– 20 juillet 1986 (RVB : XS1-XS2-XS3).....	49
Annexe 2 – Matrices d’erreur et Kappa des classifications.....	51
Matrice d’erreur et Kappa de la classification des biotopes synthétiques de l’image de 1986 .....	52
Matrice d’erreur et Kappa de la classification des biotopes synthétiques de l’image de 2004 .....	53
Matrice d’erreur et Kappa de la classification des formations végétales de l’image de 1986 .....	54
Matrice d’erreur et Kappa de la classification des formations végétales de l’image de 2004 .....	54

## Liste des figures

Fig. 1 - Carte pluviométrique de Madagascar .....	12
Fig. 2 - Carte de localisation de la zone d'étude .....	13
Fig. 3 - Schéma méthodologique général de l'étude.....	15
Fig. 4 - Réseau hydrographique et zone tampon de la zone d'étude.....	21
Fig. 5 - Découpage des zones tampons en segments comprenant 3 sections .....	28
Fig. 6 - Carte des biotopes synthétiques en 1986 .....	32
Fig. 7 - Carte des biotopes synthétiques en 2004 .....	33
Fig. 8 - Carte des formations végétales en 1986.....	35
Fig. 9 - Carte des formations végétales en 2004.....	36
Fig. 10 - Répartition des classes de biotope synthétique entre 1986 et 2004.....	37
Fig. 11 - Répartition des classes de formation végétale en 1986 et 2004.....	37
Fig. 12 - Superficie moyenne des parcelles de formation végétale entre 1986 et 2004 .....	37
Fig. 13 - Carte du potentiel du réseau hydrographique en 1986 .....	39
Fig. 14 - Carte du potentiel du réseau hydrographique en 2004 .....	39
Fig. 15 - Carte du potentiel de déplacement lié au réseau hydrographique.....	40
Fig. 16 - Carte des voies privilégiées de déplacement anciennes et actuelles.....	42

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques des images SPOT.....	16
Tableau 2 - Caractéristiques des bandes spectrales de SPOT .....	16
Tableau 3 - Ordre polynomial et erreur quadratique des corrections géométriques .....	19
Tableau 4 - Erreur quadratique associée à la zone de relief sur le calage de l'image de 2004 .....	20
Tableau 5 - Synthèse hiérarchique des classes utilisées.....	24
Tableau 6 - Bandes associées aux images composées.....	26
Tableau 7 - Bandes utilisées pour chaque classification .....	26
Tableau 8- Coût de déplacement du criquet nomade attribué à chaque formation végétale ....	27
Tableau 9 - Potentiel canalisateur du réseau hydrographique en fonction des formations végétales dans la partie centrale du cours d’eau et sur les 2 rives.....	29
Tableau 10 - Kappa et précision globale des classifications .....	30



## Introduction

Le criquet nomade *Nomadacris septemfasciata* (Serville, 1838) est responsable depuis longtemps de dommages causés aux cultures à Madagascar. Les premiers vols groupés de l'espèce sur l'île ont été décrits en 1930 (Frappa, 1935). Plus tard des pullulations ont été observées en 1945 et 1946 (Frappa, 1947). Au cours des années soixante une 3<sup>e</sup> vague de pullulation a traversé Madagascar (Têtefort & Wintrebert, 1967).

Plus récemment de 1997 à 2000, l'île de Madagascar a été l'hôte d'une invasion du criquet migrateur *Locusta migratoria capito* (Saussure, 1884), un autre locuste considéré jusqu'alors comme plus dangereux. Cette invasion a été accompagnée par de nombreuses pullulations du criquet nomade (Franc & Duranton, 2001) qui se sont ensuite aggravées, particulièrement dans le bassin de la Sofia (nord-ouest de l'île). Les dégâts causés par ce dernier dans la région sont devenus considérables sur l'agriculture (Duranton et Franc, c.p.). Le criquet nomade a pour la première fois atteint la phase grégaire dans le bassin de la Sofia (Franc *et al*, 2005). Cette transformation phasaire aboutie aurait été possible grâce à de profondes modifications environnementales liées à la déforestation. Le lien entre la déforestation et les pullulations du criquet sont donc à éclaircir.

Suite à ces événements, un programme de recherche sur le criquet nomade a été mené par le CIRAD en partenariat avec le Centre National Antiacridien malgache (CNA) afin de comprendre le problème et de proposer des solutions opérationnelles de surveillance et de lutte. Ce programme de recherche comprend la thèse d'Alex Franc qui porte sur l'impact des transformations mésologiques sur la dynamique des populations du criquet nomade dans le bassin de la Sofia. Ce stage fait partie intégrante de la thèse.

Pour que le criquet pullule et grégarise, il doit multiplier ses effectifs et pouvoir se rassembler lors de migrations saisonnières. La liaison entre la déforestation et les pullulations doit donc expliquer l'évolution des couloirs de déplacement du criquet et l'ouverture de nouvelles zones de ponte. La finalité du stage est de comprendre l'impact de la déforestation sur l'évolution du potentiel de déplacement du criquet nomade entre 1986 et 2004 dans une zone située au nord-ouest du bassin de la Sofia à partir d'images satellitaires SPOT.

Ce rapport décrit tout d'abord la méthodologie appliquée pour le traitement des images satellitaires, détaille les cartes d'occupation du sol obtenues et aboutit à une analyse de l'évolution du potentiel de déplacement du criquet nomade dans la région d'étude.

# 1. Contexte et problématique de l'étude

## 1.1. Le criquet nomade

### 1.1.1. Biologie

Le criquet nomade fait partie de la famille des *Acrididae* et de la sous-famille des *Cyrtacanthacridinae*. Il a un cycle univoltin (une génération par an) qui peut être divisé en deux périodes majeures : une période de reproduction en saison des pluies et une période de diapause imaginale (arrêt de développement obligatoire des imagos) en saison sèche (Têtefort & Wintrebert, 1967). Dans le bassin de la Sofia, ces deux périodes se déroulent dans deux zones géographiques distinctes. La ponte et le développement larvaire se déroulent en basse altitude dans des milieux méso-hygrotrophes au niveau des affleurements de la nappe phréatique. (Franc & Duranton, c.p.). Ces zones correspondent à des friches buissonneuses à proximité de cultures (Randrianasolo, 1978). Les *tavy* (cultures de riz sur abattis-brûlis) laissant place à des groupements végétaux post cultureux paraissent aussi attractifs pour la ponte (Duranton, 1996). À l'arrivée de la saison sèche, le *Nomadacris* termine son développement larvaire. Les nouveaux ailés entrent en diapause et migrent vers l'est du bassin de la Sofia à la recherche de zones plus humides situées en altitude et à proximité de la côte Est (Leblanc, 2003).

Le *Nomadacris* est un insecte polyphage mais qui a une préférence pour les graminées (Randrianasolo, 1978). Il a un comportement semi-arboricole. Les larves au fur et à mesure de leur développement vont chercher des perchoirs de plus en plus hauts (grandes graminées et buissons), les ailés vont rechercher des zones herbeuses arborées (Têtefort et Wintrebert, 1967).

### 1.1.2. Polymorphisme phasaire

Le *Nomadacris* est un locuste : il peut vivre sous deux phases distinctes en fonction de sa densité, soit solitaire soit grégaire en passant par des phases intermédiaires nommées *transiens dissocians* et *transiens congregans*. Les différences entre les deux phases sont importantes sur le plan physiologique, écologique et comportemental. En phase solitaire, il vit dispersé et reste inoffensif pour les cultures, alors qu'en phase grégaire, il reste groupé en bandes larvaires ou en essaims d'ailés causant des ravages considérables sur les cultures. Le passage d'une phase à l'autre est induit par un choc densitaire ; pour le criquet nomade, le seuil de transformation phasaire est estimé à 5 000 imagos par hectare (Franc *et al.*, 2005).

Le passage de la phase solitaire à la phase grégaire s'effectue dans des zones géographiques bien déterminées appelées aires grégariques. Elles sont comprises dans l'aire d'habitat permanent des solitaires. Certaines années, lorsque les conditions sont favorables, les effectifs augmentent brusquement pouvant déclencher la transformation phasaire en cas de regroupement important. Cette transformation phasaire est bien connue chez d'autres locustes. Le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* (Forskål, 1775), par exemple, qui vit dans les zones désertiques d'Afrique du nord et d'Arabie a un seuil de transformation phasaire très bas (500 imagos par hectare). Le criquet migrateur est intermédiaire avec un seuil de transformation phasaire de 2 000 imagos par hectare.

Au sud de Madagascar, les premiers individus grégaires de criquet nomade ont été observés et décrits en 1997 mélangés à des criquets migrants. En 2002, on observera des criquets



nomade grégaires seuls dans le bassin de la Sofia : s'est alors posé la question de savoir si le bassin de la Sofia était une aire grégarigène du criquet nomade.

### 1.1.3. Migrations

Pour arriver à boucler son cycle annuel, le criquet nomade doit se déplacer entre les zones de diapause et celles de reproduction. Pour constituer une aire grégarigène, le bassin de la Sofia doit être composé d'aires écologiquement complémentaires que l'insecte exploite selon les deux périodes de son cycle. Une communication directe entre ces deux zones est indispensable pour limiter la diminution des effectifs par mortalité et permettre les regroupements menant à la grégarisation.

Une étude sur les déplacements du criquet nomade dans le sud de Madagascar (Lecoq *et al*, 2006) démontre clairement ce mouvement saisonnier entre des zones de diapause sur les hauteurs à l'est et des zones de développement larvaire à l'ouest. Dans la Sofia, des données d'enquêtes ont permis de délimiter les zones de développement larvaire (l'ensemble du bassin de la Sofia) et les zones de diapause (les contreforts orientaux des hauts plateaux à la limite de la côte est) (Leblanc, 2003).

Le criquet nomade solitaire se déplace par vol sur de longues distances lorsque la température chute en fin de journée, juste après le coucher du soleil. Cependant en dessous de 21°C, le criquet nomade ne pourra plus voler. Si la température crépusculaire est trop basse, le criquet solitaire ne peut plus se déplacer. En saison sèche et fraîche il reste donc bloqué dans des zones froides en attendant le retour de températures propices au vol (Chapman, 1959). Par contre, si les conditions sont favorables, il peut entreprendre des déplacements de quelques kilomètres par jour. Il effectue généralement des vols suivant la direction des vents.

Le criquet nomade, comme les autres acridiens, vole le long d'itinéraires particuliers appelés voies (ou routes) privilégiées de déplacement. Ces itinéraires correspondent au sol à des formations orographiques liées au relief, à la présence d'un réseau hydrographique ou à des formations végétales particulières. Les voies orographiques sont observées le long de dénivelés importants (falaise, bordure de massifs). Les voies hydrographiques sont formées par les vallées des cours d'eau. En l'absence d'autres éléments directionnels, les axes de défrichement maximum de végétation sont préférentiellement empruntés par les ailées (Duranton *et al*, 1979).

Les voies de déplacement sont séparées les unes des autres par des obstacles à la progression de l'acridien : massifs montagneux, larges étendues d'eau, ou massifs forestiers denses. Ces obstacles créent un effet d'ombrage, c'est-à-dire que les biotopes situés dans leur prolongement, même s'ils sont favorables au criquet, sont difficilement colonisés (Farrow, 1990).

Dans le cas de voies ouvertes par le défrichement, l'insecte a une réaction optomotrice (liée à la vue de formes) qui l'amène à suivre la limite entre des bandes blanches et des bandes sombres. Or, survolées à basse altitude à la tombée du jour, les zones défrichées forment des percées claires au milieu d'un couvert forestier sombre (Duranton *et al*, 1982).

Des densités considérables d'insectes peuvent se trouver rassemblées au point d'aboutissement de ces itinéraires. Les voies privilégiées de déplacements, ont donc des conséquences majeures sur la dynamique des populations du criquet (Lecoq, 1975).

## **1.2. Présentation de la zone d'étude**

### **1.2.1. Madagascar**

Madagascar est une île située dans l'Océan Indien séparée de la côte est du continent africain par le canal du Mozambique. L'île a une superficie de 587 041 km<sup>2</sup>, s'étendant sur 1 570 kilomètres en longueur et 565 kilomètres en largeur. L'île présente une dissymétrie est-ouest formée par la présence d'une longue épine dorsale appelée les Hautes Terres. Cette morphologie conditionne le réseau hydrographique et le climat. La partie orientale présente un redressement rapide du relief où des altitudes de 1 500 mètres sont atteintes à seulement quelques centaines de kilomètres depuis la côte. Tandis que le versant occidental est moins abrupt, une pente modérée descend des Hautes Terres jusqu'à la côte.

De décembre à mars, la zone de convergence intertropicale descend du nord au sud de l'île pour ensuite remonter. C'est la mousson qui est à l'origine de la saison des pluies avec un gradient d'intensité décroissant du nord au sud. En saison sèche, les alizés amènent des pluies en permanence sur l'est de Madagascar (Donque, 1975). Il existe donc un deuxième gradient d'intensité décroissant de l'est à l'ouest. La figure 1 présente la pluviométrie générale sur l'île.

La grande île présente quatre climats distincts (Donque, 1975) :

- L'Ouest avec deux saisons contrastées : une saison des pluies de novembre à avril et une saison sèche de mai à octobre. Les températures restent élevées même en saison sèche. Le climat du bassin de la Sofia est de ce type.
- La côte est soumise au vent de l'alizé. Cet air marin combiné à l'effet orographique génère des précipitations annuelles abondantes. Il n'y a pas de saison sèche. Les précipitations annuelles dépassent les 1 500 mm. Les moyennes de température annuelle varient autour de 24 °C.
- Les Hautes Terres ont un climat tropical d'altitude avec une saison sèche et fraîche et une saison chaude et humide. C'est une zone de transition entre l'est et l'ouest de l'île où les pluies sont abondantes et mieux réparties dans la portion orientale.
- Le Sud et le Sud-Ouest présentent un climat semi-aride, les précipitations annuelles sont erratiques et sont inférieures à 500 mm d'eau.



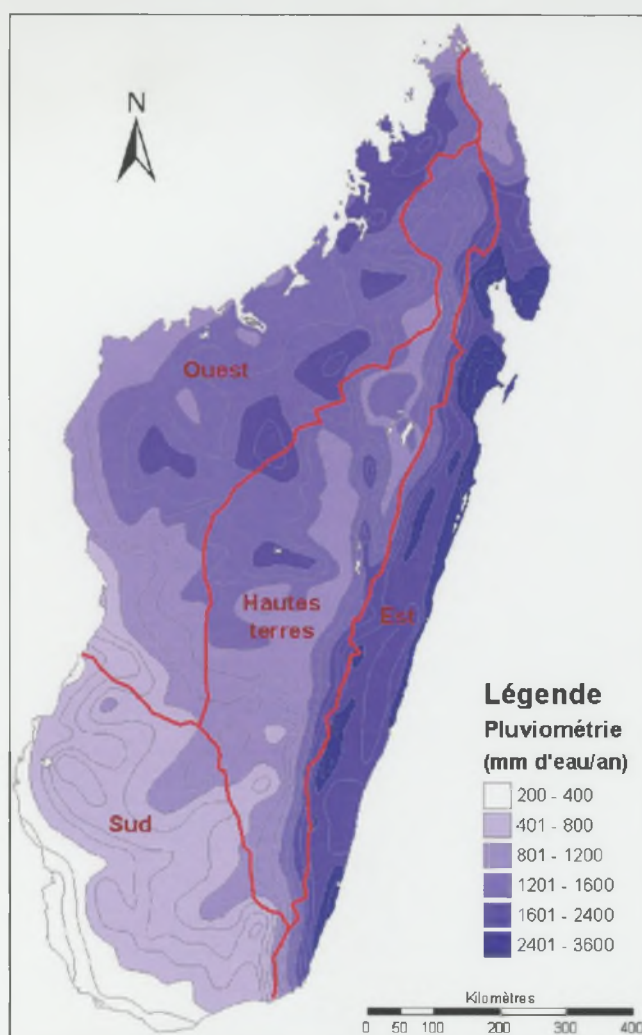


Fig. 1 - Carte pluviométrique de Madagascar

L'activité humaine sur l'île a un effet destructeur sur la forêt. La pratique des *tavy* consistant à exercer la culture itinérante sur abattis-brûlis (principalement la riziculture), est essentiellement responsable de cette déforestation. Une parcelle de forêt est coupée, puis brûlée pour être cultivée pendant 2 à 5 ans. Elle est ensuite abandonnée et se ré-embroussaille progressivement pour donner une forêt secondaire, dite *savoka*. Si cette *savoka* est rebrûlée rapidement et régulièrement, le processus de savanisation s'enclenche jusqu'à obtenir des formations herbeuses pures (Aubert & Razafiarison, 2003). La répétition et l'accélération des brûlis réduisent progressivement les superficies forestières (Gauthier *et al*, 1999).

### 1.2.2. Le bassin de Sofia

La zone d'étude a une superficie de plus de 2 600 km<sup>2</sup> et elle se situe au nord-ouest de Madagascar, au nord du bassin versant de la Sofia (figure 2). Cette zone est intéressante puisqu'elle est à cheval sur deux régions distinctes : la partie occidentale sur des sols sédimentaires où le criquet nomade effectue uniquement sa reproduction en saison des pluies et la partie orientale, sur le socle cristallin, où le criquet se rétracte en saison sèche pour passer la diapause. La présence de ces deux régions au sein de la zone d'étude permet de s'intéresser aux déplacements saisonniers du criquet nomade.



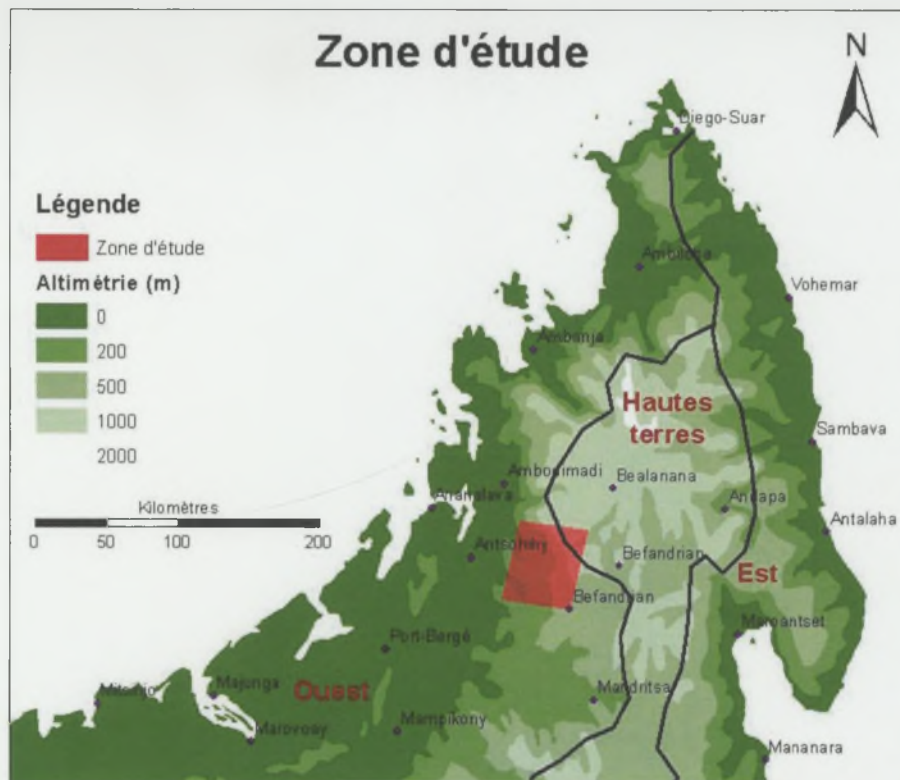


Fig. 2 - Carte de localisation de la zone d'étude

Le réseau hydrographique principal à l'intérieur de la zone s'écoule d'est en ouest, reliant les zones de reproduction et de diapause. Celui-ci est donc susceptible d'offrir un corridor de déplacement intéressant pour le criquet.

Dans la section ouest de la zone d'étude, se trouve une partie de la réserve spéciale Bora : forêt caducifoliée dense de 25 mètres de haut, très riche en espèces endémiques. Théoriquement, toute activité humaine est interdite depuis 1964. Toutefois, le manque de surveillance a permis aux populations avoisinantes de pratiquer le *tavy* depuis de nombreuses années (Nicoll & Langrand, 1989). Cette déforestation a-t-elle pu ouvrir des corridors de déplacement pour le criquet nomade ?

### 1.3. Objectifs et méthode

#### 1.3.1. Objectifs

Pour savoir si le bassin de la Sofia est une aire grégarienne du criquet nomade et comprendre son fonctionnement, il est essentiel de comprendre quelles sont les possibilités de déplacement entre les 2 aires complémentaires nécessaires au développement de l'insecte. Le criquet se reproduit essentiellement dans les parties occidentales du bassin et passe sa diapause dans les parties hautes à l'est. Pour arriver à pulluler et à grégatiser, il faut que les effectifs augmentent et restent groupés sur plusieurs années. Il faut donc une bonne communication entre ces deux grandes régions complémentaires. Au regard de ces connaissances, nous avons fixé deux objectifs pour cette étude :

- Réaliser une analyse diachronique du tapis végétal pour permettre d'évaluer l'évolution du potentiel de déplacement au cours des deux dernières décennies. En effet, la

composition du tapis végétal joue un rôle important dans le déplacement du criquet. Ce dernier est inféodé aux zones ouvertes avec un couvert forestier faible et la présence de grandes graminées. Si la forêt est dense et suffisamment compacte, elle représente un obstacle au déplacement de l'insecte. En cas de déforestation, de nouvelles voies privilégiées de déplacement seraient ouvertes, et le criquet pourrait emprunter ces nouvelles voies ouvertes à travers la forêt sous l'effet du mitage. Les connexions entre les régions orientales et occidentales pourraient être multipliées et ainsi augmenter la probabilité de colonisation de zones favorables à la ponte en début de saison des pluies et à la diapause en début de saison sèche.

– Évaluer le rôle canalisateur du réseau hydrographique. Ce réseau orienté est-ouest pourrait servir très probablement de voie privilégiée de déplacement. S'il est encombré de forêt galerie et de forêt sèche sur ses bordures, il ne pourra pas être repéré par l'insecte en vol et ne sera d'aucune utilité. Au contraire, s'il est composé d'une partie centrale ouverte et entourée de zones forestières, il représentera une voie privilégiée de déplacement.

Ces deux objectifs nous amèneront à la finalité de l'étude, qui est de tracer les voies privilégiées de déplacement anciennes et actuelles et d'analyser l'impact de cette évolution sur le potentiel de pullulation du criquet.

### **1.3.2. Méthode générale**

Pour réaliser cette étude quatre images satellitaires SPOT des années 1986, 1992, 1999 et 2004 ont été acquises. La figure 3 présente les différentes étapes qui ont été nécessaires pour réaliser la carte d'évolution du potentiel de déplacement du criquet nomade. Voici les principales étapes que nous avons suivies : la préparation des données, le traitement numérique des différentes images, la réalisation des cartes de potentiel de déplacement et leur évolution.

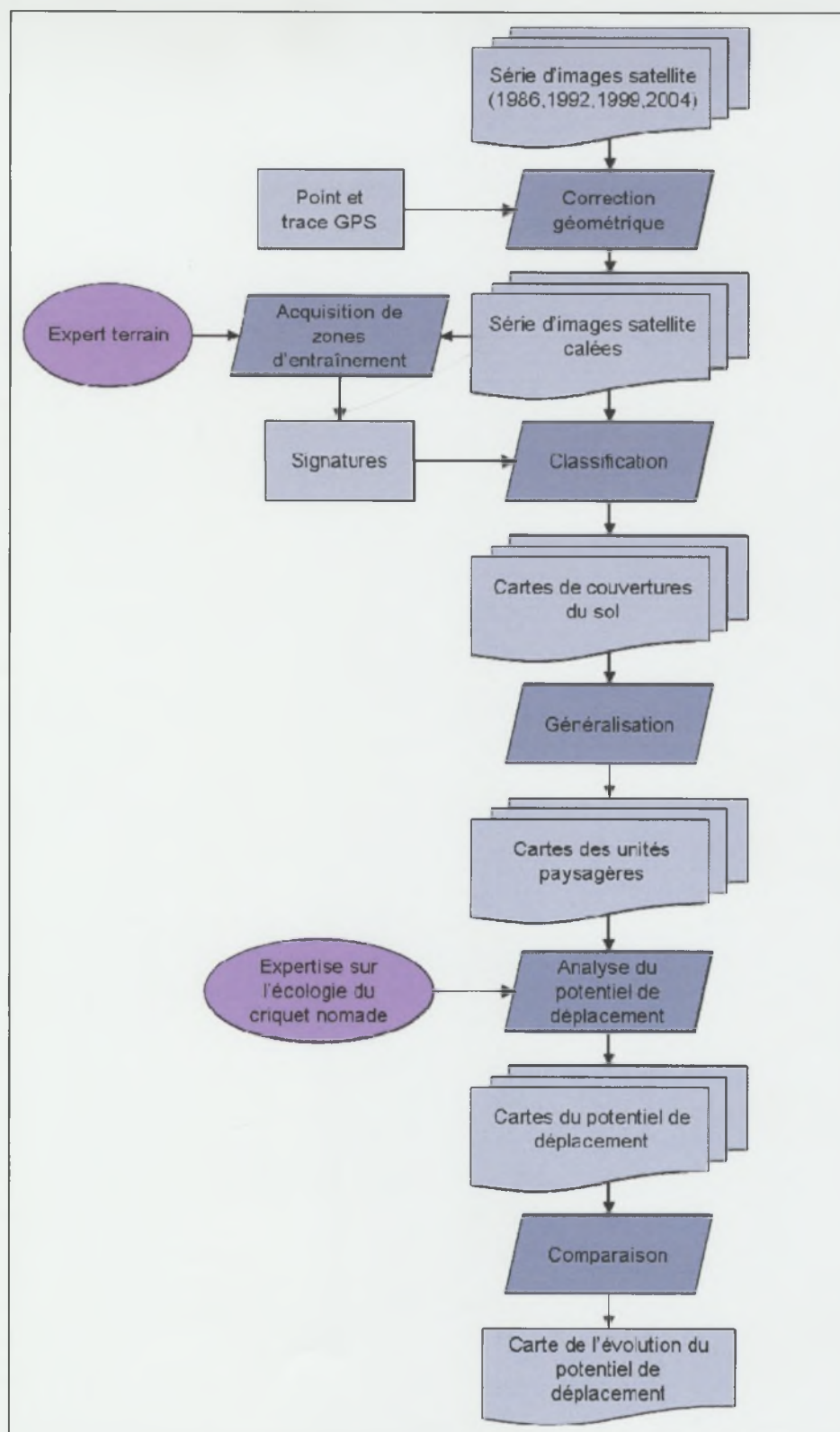


Fig. 3 - Schéma méthodologique général de l'étude



## 2. Préparation des données

Pour réaliser l'étude de l'évolution du couvert végétal, une série temporelle d'images satellitaires est nécessaire. L'information sur l'occupation du sol étant inexistante, l'utilisation de l'imagerie satellitaire est préconisée. Quatre images satellites SPOT ont été acquises, avec 18 ans d'intervalle entre la plus ancienne et la plus récente.

### 2.1. Choix des données

#### 2.1.1. Description des données

Pour l'étude, une série de dix images SPOT fournies par le programme ISIS® CNES ont été commandées. Le tableau 1 présente les caractéristiques de chacune d'elles. Ces images ont été acquises entre 1986 et 2004, entre les mois d'avril et juillet avec des modes et des domaines spectraux différents. Le tableau 2 décrit les bornes des bandes spectrales offertes par les différents capteurs. Les images codées sur 8 bits ont une résolution spatiale de 20 mètres. Pour toutes les images le niveau de prétraitement des données est 2A, ce qui correspond à une correction radiométrique des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue à une correction géométrique de base et à une correction géométrique effectuée dans la projection cartographique standard (UTM WGS84 par défaut) sans prise de points d'appui. On estime la précision de localisation à moins de 350 mètres pour ce niveau de correction sur une scène d'altitude constante. Les images ont une taille d'environ 60 km x 60 km, à l'exception de l'image de 2004 qui a une largeur de 75 km. Les images retenues pour cette étude sont présentées dans le tableau 1 et représentées en annexe 1.

Tableau 1 - Caractéristiques des images SPOT

Date	Heure	Satellite	Instrument	Mode spectral	Bandes spectrales				Pré-traitement	Angle de prise de vue		Angle solaire	
					XS1	XS2	XS3	XS4		Orientation	Incidence	Azimuth	Élévation
1986-07-20	07:05:40	SPOT1	HRV 1	XS	x	x	x		2A	9,1	R2,2	36,6	45,5
1987-06-02	07:08:48	SPOT1	HRV 1	XS	x	x	x		2A	8,9	L2,6	32,9	45,5
1987-05-28	07:04:54	SPOT1	HRV 1	XS	x	x	x		2A	9,3	R5,6	34,4	45,7
1992-06-01	07:03:18	SPOT1	HRV 1	XS	x	x	x		2A	9,1	R2,2	34,1	45,5
1999-04-08	07:01:37	SPOT4	HRVIR 2	XI	x	x	x	x	2A	9,3	R11,4	52,4	55,7
1999-05-10	07:14:39	SPOT2	HRV 2	XS	x	x	x		2A	8,6	L9,7	34,8	50,3
2000-04-10	07:25:20	SPOT4	HRVIR 2	XI	x	x	x	x	2A	8,0	L30,5	42,2	57,8
2000-06-27	07:25:28	SPOT4	HRVIR 2	XI	x	x	x	x	2A	8,0	L29,8	28,5	44,8
2004-04-26	07:20:54	SPOT4	HRVIR 1	XI	x	x	x	x	2A	8,1	L26,6	36,1	53,9
2004-06-22	07:25:16	SPOT4	HRVIR 1	XI	x	x	x	x	2A	8,0	L30,5	28,1	44,9

Images sélectionnées

Tableau 2 - Caractéristiques des bandes spectrales de SPOT

Bande	Bornes spectrale (µm)	Spectre
XS1	0,50 - 0,59	vert
XS2	0,61 - 0,68	rouge
XS3	0,79 - 0,89	PIR
XS4	1,58 - 1,75	MIR

### 2.1.2. Les contraintes

Afin de sélectionner les données appropriées à cette étude diachronique, les images ont été choisies en fonction de deux contraintes principales :

- Les contraintes liées au système d'acquisition

Les images ont été acquises dans deux modes spectraux différents. En effet, les résolutions spatiales et radiométriques sont identiques, mais les résolutions spectrales diffèrent pour le mode XI, où une bande spectrale supplémentaire est offerte dans le moyen infrarouge. L'angle de visée du capteur a également été pris en considération, de trop grands écarts d'angle peuvent créer des déformations de façon à ne pas pouvoir superposer les images entre elles. De plus, cette différence d'angle de visée entre les images modifie la réflectance mesurée de la surface : avec un angle de visée faible, on enregistre des valeurs radiométriques correspondant au sommet de la canopée. Alors qu'avec un angle de visée fort, on enregistrera des valeurs correspondant au côté du couvert (Jensen, 2005). Le fait que les angles d'incidence aient été très variables à l'intérieur de la banque d'image disponible a été un facteur limitant dans le choix des images.

- Les contraintes liées aux conditions environnementales

Les conditions atmosphériques ont également été un facteur limitant. En effet, la présence d'une couverture nuageuse au cours de l'acquisition d'une image satellite dans le domaine du visible masque complètement la surface du sol (Jensen, 2005). Les images disponibles, dans la plupart des cas, ont un couvert nuageux très faible.

La saisonnalité a également été prise en compte. L'étude de la végétation et de son évolution dans le temps, nécessite l'utilisation d'images prises à la même saison afin de réduire au mieux les variations phénologiques de la végétation selon les saisons (Jensen, 2005). Les conditions d'humidité sont ainsi prises en compte, puisque celles-ci auront une influence sur les propriétés de réflectance de la surface (Jensen, 2005). Dans la zone d'étude, les images prises en avril (fin de la saison des pluies) auront une surface plus humide que celles prises en juillet (saison sèche).

### 2.1.3. Les données retenues

Les quatre images choisies ont été acquises entre 1986 et 2004 avec un écart de 5 à 7 ans entre elles. Les caractéristiques des images retenues apparaissent dans le tableau 1 en grisé. Les traces des images satellites n'étant pas identiques, nous avons centré notre étude sur la zone commune couvrant une superficie d'environ 2 600 km<sup>2</sup>. Parmi les quatre images, nous avons tout de même gardé l'image de 1986 et celle de 1992 qui comporte quelques nuages dans la partie est de la zone d'étude. Les images de 1986 et 1992 ont été acquises en mode XS, celles de 1999 et 2004 en mode XI.

L'angle d'incidence est faible pour les images de 1986 et 1992 (R2,2°). En revanche, il varie beaucoup pour les images de 1999 (R11,4°) et de 2004, (L26,6°) et ce, dans des directions opposées. Cette variation de l'angle de visée entre les images est une véritable difficulté, notamment pour la correction géométrique des images et plus spécifiquement dans les zones géographiques affectées par un relief marqué où les déformations géométriques seront relativement importantes.

Par manque de données, les quatre images sélectionnées n'ont pas été prises exactement à la même période de l'année. Ainsi la phénologie de la végétation n'est pas exactement au même



stade entre chaque image. La réflectance de la surface pour un même type de végétation risque de différer d'une image à l'autre, ce qui rend une comparaison directe difficile.

## **2.2. Correction géométrique et ré-échantillonnage**

L'étude diachronique impose une superposition maximale des différentes images. Le niveau de correction 2A étant insuffisant, nous avons été contraints d'effectuer une légère correction géométrique des différentes images pour rendre leurs comparaisons possibles.

### **2.2.1. Préparation de l'image de référence**

- Sélection de l'image de référence

Nous avons opté pour le géoréférencement à partir d'une image de référence. Nous avons choisi l'image de 1992 comme image de référence, nous avons dû préalablement la recaler à partir de points GPS pris sur le terrain. Cette image a été choisie comme référence car elle a un angle d'incidence très faible ( $R2,2^\circ$ ) permettant de minimiser les distorsions et de rendre le calage avec les points GPS plus aisé. De plus, son angle d'incidence se situe entre les angles des images de 1999 ( $R11,4^\circ$ ) et 2004 ( $L26,6^\circ$ ), ce qui permettra d'optimiser leur calage.

L'image de 1986 qui a également un angle de visée faible, n'a pas été retenue car elle possède une couverture nuageuse qui aurait limité le nombre de point de contrôle et n'aurait donc pas été une bonne image de référence pour le calage des autres images.

- Calage de l'image de référence à partir de points GPS

Le calage de l'image de référence a été réalisé à partir de points GPS collectés sur le terrain. La zone d'étude étant peu accessible, les points ont été essentiellement collectés le long de la route nationale 32 qui traverse l'image et à chaque pont rencontré. Dans un premier temps, les données GPS ont été projetées dans le même système de projection que les images satellites (UTM zone 39S, datum WGS84). Par photo-interprétation, les points ont pu être placés précisément sur l'image de 1992 en repérant les intersections entre les routes et les cours d'eau. Cependant, la répartition des points de contrôle ne répondant pas à la règle de l'homogénéité spatiale nécessaire pour éviter toute distorsion géométrique localisée sur l'image, nous avons été contraints de rajouter manuellement des points d'amer par interprétation visuelle. Le type de correction géométrique appliqué sur l'image de 1992 est une correction polynomiale d'ordre 1. Cet ordre de correction a été suffisant pour obtenir un bon calage tout en limitant les déformations radiométrique et géométrique (Jensen, 2005).

### **2.2.2. Calage des autres images par rapport à l'image de référence**

L'image corrigée de 1992 a servi de référence pour le calage des autres images. Pour chaque image, nous avons réparti une série de points de contrôle respectivement dans l'image à caler et dans le référentiel. Nous avons essayé au mieux de répartir les points de façon homogène. La zone étant peu peuplée, il a été difficile de choisir des points de contrôle. Les routes étant rares, les jonctions de cours d'eau et les sommets ont été le plus souvent utilisés comme repère. Nous avons fait varier le nombre de points en fonction du niveau de correction polynomiale appliqué, afin d'obtenir une RMS (Root Means Square ou erreur de localisation) acceptable.



### 2.2.3. Résultats

- Image de référence 1992

La correction géométrique de l'image de référence a été validée de façon qualitative en utilisant la trace GPS de la route nationale 32. Les résultats du calage sont corrects avec une RMS ou EMQ (Erreur Moyenne Quadratique) de 0,1343. On note néanmoins un léger décalage à l'est de l'image notamment dans les parties escarpées de la zone d'étude. L'erreur quadratique est calculée par ERDAS en mètre. Une erreur de 20 mètres correspond donc à un pixel. Le tableau 3 présente les ordres polynomiaux et les erreurs quadratiques des corrections géométriques pour chaque image.

Tableau 3 - Ordre polynomial et erreur quadratique des corrections géométriques

Année	Ordre polynomial	Référence	Erreur quadratique (m)		
			X	Y	Total
1986	1	1992	0,5215	0,4341	0,6785
1992	1	Points GPS	0,0834	0,1053	0,1343
1999	2	1992	0,2977	0,4582	0,5464
2004	3	1992	0,8386	0,2626	0,8787

- Image de 1986

Le type de correction utilisée pour le calage de l'image de 1986 est aussi une correction polynomiale d'ordre 1, puisque les conditions de prise de vue sont les mêmes qu'en 1992. L'image résultante de cette correction est satisfaisante et ce sur l'ensemble de la scène avec une EMQ de 0,67.

- Image de 1999

L'image de 1999 a été acquise avec des angles de prise de vue différents de ceux de l'image de référence. Les déformations entraînées par ce changement d'angle au niveau du relief ne peuvent être corrigées convenablement avec une correction polynomiale d'ordre 1. Une correction de 2<sup>e</sup> ordre a donc été nécessaire pour ce calage. L'erreur quadratique qui en résulte est de 0,5464 mètre. La distribution des points de contrôle n'a pas pu être faite sur l'ensemble de l'image car elle ne couvre pas exactement la même zone géographique. La qualité de la correction géométrique dans la partie située à l'extérieur de l'image de référence ne peut donc être validée. Pour ce qui est des parties communes la correction est acceptable avec des décalages plus importants dans les reliefs situés à l'est de la zone.

- Image de 2004

Pour l'image de 2004, une correction polynomiale d'ordre 3 a été nécessaire pour obtenir une correction géométrique satisfaisante. En effet, l'angle de prise de vue étant important (L26.6), nous avons réalisé une correction polynomiale d'ordre élevé favorisant ainsi la géométrie à la radiométrie. D'une façon générale, les résultats du géoréférencement sont satisfaisants avec une EMQ de 0,87. On observe néanmoins de faibles décalages dans les parties escarpées du relief.

L'image originale de 2004 a été acquise avec un angle d'incidence très différent de celui de l'image de référence. Cette différence a entraîné des déformations sur les zones de relief et une évaluation de l'erreur de calage sur ces zones est nécessaire afin d'en connaître la qualité de la superposition. Pour ce faire, une série de points de vérification a été acquise sur ces zones de relief. Le tableau 4 présente l'erreur quadratique pour l'image de 2004 sur les zones de relief. L'erreur quadratique moyenne trouvée pour ces zones est de 323 mètres. Il est

important de prendre en considération cette erreur afin de s'assurer que les comparaisons effectuées entre les images soient significatives.

Tableau 4 - Erreur quadratique associée à la zone de relief sur le calage de l'image de 2004

Erreur quadratique (m)		
X	Y	Total
320	47	323

#### 2.2.4. Rééchantillonnage

La correction géométrique produit une nouvelle matrice de l'image en fonction de l'équation polynomiale trouvée. Une méthode de rééchantillonnage est utilisée pour assigner une valeur au pixel de la nouvelle matrice d'après la matrice initiale de l'image. La méthode de rééchantillonnage utilisée pour la correction radiométrique de l'ensemble des images est celle du plus proche voisin. Cette méthode consiste à assigner au pixel de la matrice corrigée, la valeur exacte du plus proche pixel de la matrice initiale. Cette méthode a pour avantage de conserver les valeurs radiométriques originales de l'image initiale (Jensen, 2005). De plus, la méthode est appropriée à une classification et c'est la méthode la plus simple et rapide à exécuter (Anonyme (Leica Geosystems), 2003). Par contre, l'utilisation de la méthode du plus proche voisin peut entraîner la disparition ou la duplication de pixels de l'image originale, ce qui peut avoir pour effet de déformer ou d'occasionner des discontinuités sur des éléments linéaires (Anonyme (Leica Geosystems), 2003).

### 2.3. Extraction du réseau hydrographique

Une des questions est de comprendre l'évolution du rôle du réseau hydrographique comme voie de déplacement du criquet. Nous avons donc délimité et vectorisé le réseau hydrographique puis généré des zones tampons tel que présenté à la figure 4.

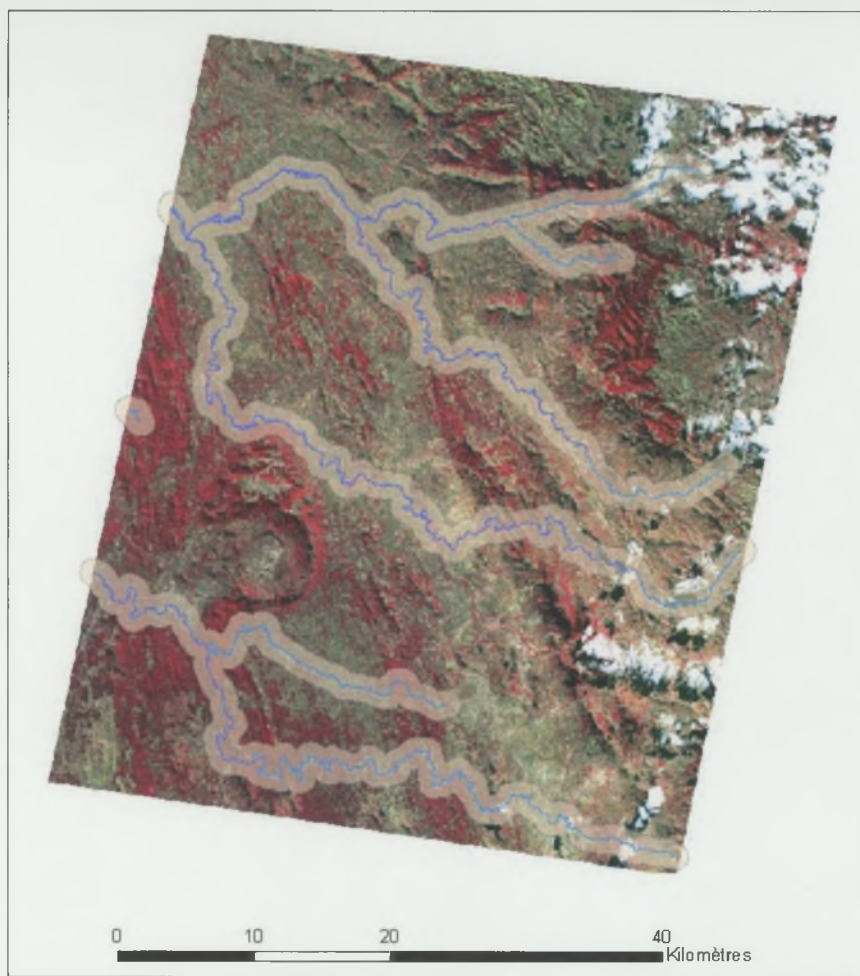
- Extraction du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique a été extrait à partir de l'image de 1999. Cette image a été sélectionnée car c'est celle-ci qui permettait de mieux discerner le réseau hydrographique. Une classification supervisée a été effectuée sur l'image afin d'extraire le réseau hydrographique. Pour ce faire, des parcelles d'entraînements ont été sélectionnées dans le lit des cours d'eau. Une fois extrait, le réseau a été converti en couche vectorielle. Certaines corrections ont été effectuées manuellement pour corriger des pixels mal classés et pour ajouter certains segments qui n'ont pas pu être cartographiés.

- Création de zones tampons

À partir du réseau hydrographique vectorisé, deux couches tampons de distances de 100 m et de 1000 m ont été produites à l'aide du logiciel ArcGIS 9. La bande des 100 m représente le lit de la rivière et ses bordures immédiates et la bande des 1000 m représente le biotope adjacent à la rivière (figure 4).





**Fig. 4 - Réseau hydrographique et zone tampon de la zone d'étude**

#### **2.4. Modèle numérique d'altitude (MNA)**

La présence des reliefs jouant un rôle dans le déplacement du criquet nomade ce facteur a été pris en compte dans notre étude. Pour ce faire, un MNA a été utilisé permettant ainsi d'extraire les pentes du relief qui au delà d'un certain seuil deviennent un facteur contraignant au déplacement du criquet. Le MNA, d'une résolution d'environ 90 mètres a été acquis par la Shuttle Radar Topography Mission de la NASA en 2002 et téléchargé gratuitement sur le site Web : <http://glcf.umiacs.umd.edu>.



### 3. Cartographie du potentiel de déplacement

#### 3.1. Choix de la méthode de télédétection du changement

Pour mettre en évidence l'évolution du potentiel de déplacement du criquet nomade dans la zone d'étude, il est nécessaire d'appliquer une méthode de comparaison des images acquises aux différentes dates afin de mettre en évidence les zones de changement.

Il existe trois grands groupes de méthodes de télédétection du changement (Mas, 2000) :

- Les méthodes préclassificatoires consistent à mettre en évidence les variations des valeurs radiométriques entre des images de différentes dates. Ce type de méthode est relativement simple à appliquer en effectuant une différence ou une division d'image. Par contre, la nature des changements détectés peut être difficile à interpréter (Mas, 2000). Ceux-ci sont d'ailleurs très sensibles aux variations radiométriques dues aux effets atmosphériques et aux variations saisonnières (Chavez & Mackinnon, 1994). De plus, ces techniques sont très sensibles aux erreurs de calage des images (Townshend *et al.*, 1992).
- Les classifications multidates consistent à produire une image composée d'une couche d'informations pour chaque année à comparer et y appliquer une classification pour en faire ressortir les changements. Ces techniques sont moins sensibles aux lacunes de superposition d'image ainsi qu'aux différences radiométriques. Par contre, l'identification des classes devient rapidement très laborieuse avec l'augmentation du nombre de classes et les résultats obtenus sont souvent peu concluants (Mas, 2000).
- Les méthodes postclassificatoires consistent à exécuter des classifications sur chacune des images pour ensuite produire une comparaison entre les images classées. Ces dernières permettent de tenir compte de la nature des changements. En revanche, elles ont une tendance à surestimer la quantité de changement et la qualité de la comparaison dépend grandement de la qualité des classifications (Stow *et al.*, 1980). Toutefois, la comparaison postclassificatoire semble la plus appropriée lorsque les images utilisées ne sont pas acquises dans des conditions homogènes et comparables et lorsque la correction géométrique n'est pas parfaite (Mas, 2000).

Compte tenu des caractéristiques des images utilisées ainsi que du géoréférencement dont la qualité est faible dans certains secteurs, nous avons choisi une méthode postclassificatoire pour la comparaison des classifications.

Pour appliquer cette méthode, un travail important de classification des images doit être réalisé puisque la qualité du résultat final dépend grandement de la qualité des classifications obtenues sur chacune des images. L'effort nécessaire pour réaliser les classifications est crucial : il est nécessaire d'acquérir des sites d'entraînement distincts d'une image à l'autre puisque les caractéristiques radiométriques sont différentes pour chaque image. Toutefois, il ne sera pas nécessaire d'appliquer de correction radiométrique, car il n'y aura pas de comparaison directe et absolue entre les images (Jensen, 2005).

## **3.2. Classifications des biotopes acridiens**

### **3.2.1. Choix de la méthode de classification**

Afin d'obtenir une carte de couverture du sol pour chaque date, une classification supervisée a été appliquée à chaque image. Le choix des sites d'entraînement s'est basé sur les biotopes acridiens préalablement définis. Pour chaque biotope, une série de sites d'entraînement a été sélectionnée. La sélection des sites d'entraînement a été faite séparément sur chaque image.

L'algorithme de classification utilisé pour l'ensemble des images est celui du maximum de ressemblance. Cet algorithme établit une probabilité d'appartenance d'un pixel à chacune des classes et assigne ce pixel à la classe ayant la plus grande probabilité. Une distribution normale des données d'entraînement est supposée. Des sites d'entraînement avec plusieurs modes doivent donc être séparés en différentes classes afin d'obtenir des sites avec un mode unique (Jensen, 2005).

Étant donné le temps imparti, seules les images extrêmes 2004 et 1986 ont été classifiées. L'objectif étant d'obtenir une méthodologie reproductible qui pourra ensuite être appliquée aux autres images de la même manière.

### **3.2.2. Détermination des classes**

La sélection des classes et la digitalisation des parcelles d'entraînement ont été réalisées avec l'aide de la connaissance du terrain d'Alex Franc. Les biotopes du criquet ont été hiérarchisés en 3 niveaux d'observation emboîtés (tableau 5). Au niveau le plus fin, 24 biotopes ont été définis, les « biotopes élémentaires ». Chaque biotope élémentaire est défini par son hygrotrophie, sa formation végétale et éventuellement par son substrat géologique. Ces 24 biotopes ont ensuite été regroupés en 10 biotopes appelés « biotopes synthétiques » sur la base des formations végétales communes. Enfin ces biotopes élémentaires ont été regroupés en 4 classes de « formations végétales » qui correspondent au niveau d'observation le plus large.

La stratégie de regroupement des classes a été faite en fonction de la densité du couvert forestier et herbeux. Les 4 classes de formations végétales se distinguent nettement par leur taux de couverture et leur degré d'ouverture et offrent donc des facilités de déplacement différentes pour le criquet nomade. Ces 4 classes de formations végétales seront ensuite utilisées pour déterminer le potentiel de déplacement.



Tableau 5 - Synthèse hiérarchique des classes utilisées

Hygrotrophie	Biotope élémentaire	Biotope synthétique	Formation végétale
hh	Forêt galerie	Forêt galerie	Forêt
h	Forêt galerie sèche		
h	Forêt terrasse		
mh	Foret sèche (cristallin)	Forêt sèche	
mh	Foret sèche (sédimentaire)		
mh	Savoka dense	Savoka dense	Mixte
mh	Foret dégradée (cristallin)	Savoka	
mh	Savoka ouverte		
m	Savoka très ouverte	Savoka très ouverte	Herbeux
h	Culture de décrue	Culture	
	Culture sèche		
h ou mh	Culture terrasse		
m	Jachère		
th	Rizière		
m	Savane arborée	Zone herbeuse	
mx	Savane arbustive		
m	Savane herbeuse		
x	Steppe		
	Steppe loudetia		
xx	Steppe roc		
hh	Lac	Eau	Non colonisable
xx	Affleurement rocheux	Sol nu	
tx	Lit sableux		
	Village	Village	

Hygrotrophie

xx:	Hyper xérophile
x:	Xérophile
mx:	Mésoxérophile
m:	Mésophile
mh:	Mésohygrophile
h:	Hygrophile

### 3.2.3. Sélection des sites d'entraînement

Les sites d'entraînement ont été échantillonnés directement sur l'image à classer par photo-interprétation à l'aide de la connaissance du terrain de M. Franc. Les échantillons recueillis ont été associés à des biotopes élémentaires. Le choix de cette méthode de sélection est simplement dû à la non disponibilité de données de terrain ou d'image de plus haute résolution qui aurait pu permettre de valider l'appartenance de l'échantillon à la classe.

Cette méthode comporte un certain facteur d'incertitude, puisqu'il est impossible de s'assurer que l'échantillon dessiné appartient vraiment à la classe qu'on lui assigne. Toutefois, pour s'assurer de la validité des sites d'entraînement les premiers échantillons ont été pris sur l'image 2004. Cette image reflète le mieux ce que l'expert a observé sur le terrain lors des récentes missions. Pour la sélection des zones d'entraînement sur l'image de 1986, des

vérifications ont été faites régulièrement afin que ces derniers soient cohérents avec ceux qui avaient été choisis avec l'image de 2004.

Étant donné l'incertitude de la prise des échantillons pour l'image de 1986, chaque site d'entraînement a été uniquement affecté à un biotope synthétique. En effet, il n'était pas possible de définir précisément le biotope élémentaire.

Les premières classifications obtenues à partir de l'image de 1986 ont révélé que cette dernière comportait une anomalie radiométrique (ligne aberrante) séparant la partie est et la partie ouest de l'image. L'image a donc dû être coupée en 2 sous-images que nous avons traitées séparément.

### **3.2.4. Création des signatures**

Une fois les échantillons acquis, ils ont été regroupés afin de former les signatures associées à chaque biotope synthétique. Certaines précautions ont été prises puisque l'algorithme de classification utilisé suppose des signatures unimodales. Pour ce faire, une analyse de séparabilité a été menée pour vérifier si les sites d'entraînement d'une même classe sont semblables; ce qui permet légitimement de regrouper les sites pour former les signatures associées aux 10 classes de biotope synthétique. Avec cette méthode, les valeurs obtenues se trouvent entre 0 et 2 000. Les valeurs supérieures à 1 900 indiquent une excellente séparabilité (biotopes très différents), de 1 700 à 1 900 une bonne séparabilité (biotopes relativement proches), et enfin pour les valeurs inférieures à 1 700 une séparabilité mauvaise (biotopes identiques) (Jensen, 2005). Cette analyse de séparabilité a été faite en utilisant les bandes originales des images. Un regroupement a ensuite été fait en toute connaissance de cause pour l'ensemble des échantillons digitalisés.

### **3.2.5. Choix des bandes spectrales**

- **Génération d'images composées**

Avant de réaliser la classification, des images composées ont été créées pour chaque image. Cette étape consiste à ajouter des bandes supplémentaires aux bandes originales SPOT. Les bandes ajoutées ont pour but d'augmenter la séparabilité entre les classes lors de la classification. Pour chaque image, nous avons ainsi ajouté aux bandes originales (B, V R, PIR et MIR), les bandes issues d'une Analyse en Composante Principale (ACP) ainsi que le NDVI (Indice de végétation normalisé). L'ACP est une opération numérique permettant de condenser l'information sous forme de bandes non corrélées. L'indice de végétation normalisé (NDVI) est intéressant puisqu'il permet de réduire les effets d'illumination et d'ombre qui peuvent être créés par le relief (Jensen, 2005). Ceci dit, ces bandes ne serviront pas toutes à la classification, mais pourront être évaluées en fonction de la séparabilité qu'elles permettent entre les classes.



**Tableau 6 - Bandes associées aux images composées**

Bande	Image composée			
	1986	1992	1999	2004
1	XS1	XS1	XS1	XS1
2	XS2	XS2	XS2	XS2
3	XS3	XS3	XS3	XS3
4	ACP1	ACP1	XS4	XS4
5	ACP2	ACP2	ACP1	ACP1
6	ACP3	ACP3	ACP2	ACP2
7	NDVI	NDVI	ACP3	ACP3
8			ACP4	ACP4
9			NDVI	NDVI

XS: Bandes originales de l'image SPOT

ACP: Bandes de l'analyse en composante principales

NDVI: Bande de l'indice de végétation normalisé

### • Sélection des bandes pour la classification

Une fois les signatures créées pour chacune des 10 classes, une analyse a été faite pour déterminer le choix des bandes offrant le maximum de séparabilité. La méthode de distance euclidienne a été utilisée, toutefois cette dernière est limitée dans le cas où les bandes n'ont pas les mêmes bornes radiométriques.

L'analyse de séparabilité par distance euclidienne a servi d'aide au choix des bandes, mais n'a pas déterminé le choix final des bandes utilisées pour chaque classification. En effet, plusieurs essais de classification ont permis de sélectionner les bandes offrant les meilleurs résultats. Le tableau 7 présente les bandes que nous avons retenues pour chaque classification.

**Tableau 7 - Bandes utilisées pour chaque classification**

Images	Bandes
1986 partie est	1, 2, 3, 7
1986 partie ouest	1, 2, 3, 7
2004	1, 2, 5, 6

### • Classification des villages

Compte tenu de la persistance des confusions entre les villages, l'eau et le sol nu, nous avons employé une méthode semi-automatique autour des zones d'erreur. Pour ce faire, des zones d'intérêts ont été isolées manuellement et dans lesquelles nous avons appliqué une classification. Les objets des zones ciblées une fois classés, nous avons extrait les bâtis que nous avons utilisés comme masque dans la classification d'origine, permettant ainsi de les isoler correctement et définitivement.

### • Classification des nuages

Les zones ayant une couverture nuageuse (image de 1986) ne permettent pas la détermination de la couverture du sol, il a été nécessaire de les classer indépendamment de façon à en produire un masque. Nous avons isolé les nuages et leur ombre par prise d'échantillon d'entraînement. Suite à la classification, les pixels classés par erreur ont été corrigés

manuellement. Une zone tampon de deux pixels a été faite sur les classes de nuage et d'ombre afin de s'assurer de masquer complètement les zones nébuleuses.

- **Classification des zones d'ombre de relief**

Il est apparu que les zones de relief de la partie nord-est de l'image posaient un problème de classification : toutes les pentes étaient classées en forêt galerie ! Il a donc été nécessaire de prendre des parcelles d'entraînement spécifiques à cette zone pour arriver à faire ressortir les formations sur les pentes, essentiellement des formations herbeuses et mixtes. Cette étape supplémentaire ne présente aucune difficulté technique, mais a rallongé le temps de traitement.

### **3.3. Détermination des voies de déplacement privilégiées et de leur évolution**

Pour définir les voies privilégiées de déplacement et leur évolution, nous avons du préalablement déterminé le rôle de chaque couche : l'orographie, le couvert végétal et le réseau hydrographique. La première analyse vise à tracer les voies potentielles orientées d'est en ouest basées sur la nature du couvert végétal et l'orographie, la seconde analyse cherche à démontrer le rôle particulier du réseau hydrographique.

#### **3.3.1. Potentiel de déplacement selon la végétation et le relief**

Chaque formation végétale est plus ou moins propice au déplacement du criquet nomade. Un coût de déplacement pour le criquet nomade a été attribué pour chaque formation végétale (tableau 8) en fonction de la difficulté qu'il offre au déplacement de l'insecte. La forêt par exemple, jouant un rôle de barrière au déplacement du criquet s'est vu attribué un coût de déplacement maximal.

**Tableau 8- Coût de déplacement du criquet nomade attribué à chaque formation végétale**

<b>Formation végétale</b>	<b>Coût de déplacement</b>
Forêt	20
Mixte	5
Herbeux	1
Non colonisable	1

L'orographie a également été prise en compte dans l'attribution des coûts. Pour cela nous avons utilisé la carte des pentes que nous avons générée à partir du MNA (Cf. 2.4) Le criquet peut difficilement franchir des pentes fortes, un coût de déplacement de 1 000 a été attribué aux pentes de plus de 30 degrés, rendant impossible le franchissement d'un tel relief.

Une agrégation des pixels de la classification a été faite de façon à obtenir des pixels d'une taille de 500 mètres pour laquelle nous avons affecté la valeur de la classe majoritaire sur cette zone. Le choix de cette résolution a été fait en considérant les limites liées à la superposition des images et de façon à obtenir une information suffisamment globale. Ainsi, pour mesurer l'évolution, la comparaison de pixels sera exacte sur toute la scène Spot, notamment dans les reliefs où la précision du calage est la moins bonne. En revanche, la précision des résultats diminue, passant de 20m de résolution à 500m. Ensuite les pixels



appartenant à la même classe ont été agglomérés pour créer de larges surfaces de formation végétale. La formation végétale dominante dans le pixel de 500m a été conservée.

Une matrice des coûts de déplacement a été générée pour chaque image à partir des valeurs de potentiel de déplacement définies préalablement (tableau 8). La fonction « Cost/Distance » d'ArcGIS a permis d'isoler les corridors de déplacement orientés principalement d'est en ouest. Cette fonction permet de calculer le coût le plus faible pour rejoindre 2 endroits. Il faut définir au préalable le point de départ et d'arrivée pour le calcul du coût :

- une ligne à l'est de l'image suivant la courbe des nuages a été dessinée, elle représente le départ,
- une autre ligne sur la bordure occidentale de l'image représente l'arrivée.

Pour chaque date, un calcul de coût pour joindre le départ et l'arrivée a été réalisé, ce qui a ainsi permis de cartographier les voies de déplacement anciennes et nouvelles.

### 3.3.2. Rôle du réseau hydrographique

Pour comprendre le rôle des rivières dans le déplacement des criquets, il faut prendre en compte la formation végétale dans la partie centrale du cours d'eau et sur les 2 rives. Les rivières peuvent être des voies de déplacement si elles sont les seules parties dégagées au cœur de zones boisées (bande claire au milieu d'un couvert sombre), ou si elles sont les seules parties boisées au milieu de zones herbeuses (bande sombre au milieu d'un couvert clair). Dans le cas inverse où les rivières sont couvertes de forêts galeries et les alentours couverts de forêt, alors elles ne jouent aucun rôle dans le déplacement du criquet. Enfin si la bordure de la rivière est totalement déboisée et qu'elle traverse des zones herbeuses, elle ne guidera pas les insectes en déplacement.

Une rivière peut servir de voie de déplacement sur toute ou partie de sa longueur. Il faut donc diviser la ligne de la rivière en segments de faible distance et homogènes du point de vue de la formation végétale et du dénivelé. La longueur des segments a été fixée à 3km (figure 5). L'analyse du potentiel de déplacement se fera au niveau de chaque segment. Par ailleurs, sur tout le long du cours d'eau, il faut séparer la partie centrale et les 2 rives (fig. 5). Les zones tampons (100 et 1000 m) créées précédemment (cf. 2-3) ont été utilisées pour extraire les statistiques des formations végétales de 1986 et 2004. Nous avons ensuite calculé pour chaque division le pourcentage occupé par chaque formation végétale.

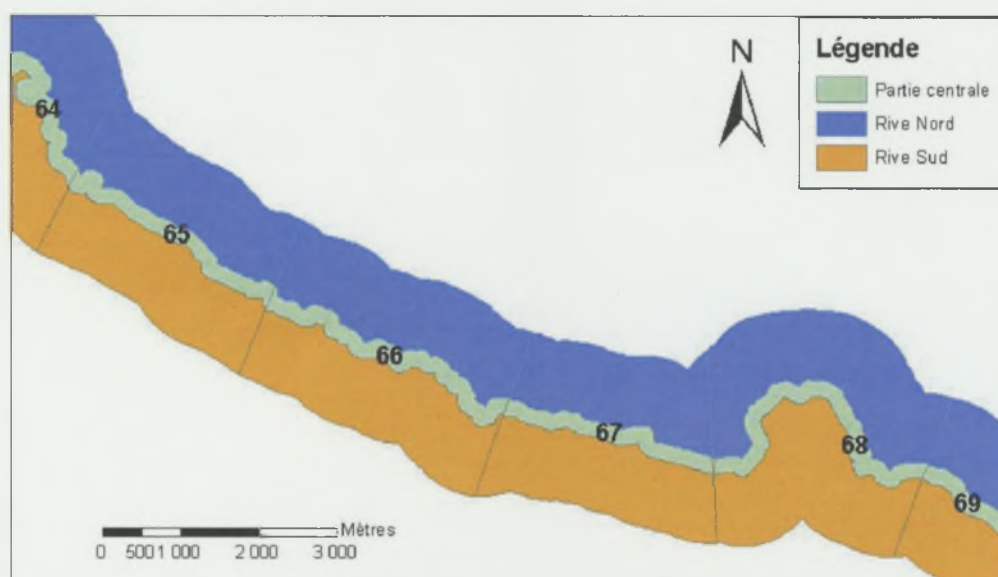


Fig. 5 - Découpage des zones tampons en segments comprenant 3 sections

Le croisement de la formation végétale sur la partie centrale et les 2 rives adjacentes aboutit à 6 cas possibles. Pour les 6 cas rencontrés, un potentiel du rôle canalisateur du cours d'eau a été établi (tableau 9).

**Tableau 9 - Potentiel canalisateur du réseau hydrographique en fonction des formations végétales dans la partie centrale du cours d'eau et sur les 2 rives**

Partie centrale	Rive Sud/Rive Nord	Potentiel
Herbeux	Non herbeux	3
Forêt ou mixte	Herbeux sur les 2 rives	3
Herbeux	Herbeux sur 1 rive	2
Herbeux	Herbeux sur les 2 rives	1
Forêt ou mixte	Herbeux sur 1 rive	1
Forêt ou mixte	Non herbeux	0

Chaque segment est donc caractérisé par un potentiel de déplacement de 0 (nul) à 3 (fort). On obtient donc une carte du rôle canalisateur du réseau hydrographique pour les deux dates de prise de vue (fig. 13 à 15).

### 3.3.3. Voies privilégiées de déplacement

Les voies privilégiées de déplacement sont la combinaison de 3 couches :

- Les voies orographiques,
- Les voies ouvertes dans le couvert végétal,
- Les voies le long du réseau hydrographique.

La carte des voies privilégiées de déplacement a ainsi été réalisée pour l'année 1986 et pour 2004.



## 4. Résultats

### 4.1. Biotopes acridiens

Les classifications effectuées ont généré quatre cartes de couverture végétale : une carte de biotopes synthétiques puis une carte des formations végétales pour les 2 années.

#### 4.1.1. Qualité des classifications

La qualité des classifications a été évaluée en utilisant une matrice d'erreur ainsi que le coefficient de Kappa. Une série de points d'évaluation a été sélectionnée pour chaque image. D'après Congalton (1991) et Jensen (2005) cinquante points de vérification par classes sont nécessaires. Il est généralement conseillé de choisir ces points de façon aléatoire afin de ne pas biaiser les résultats obtenus par la matrice d'erreur (Jensen, 2005). Néanmoins, cette méthode est souvent difficile à mettre en œuvre, car elle demande une connaissance parfaite du terrain et des moyens importants. Nous avons ainsi fait le choix de nous appuyer sur les connaissances de terrain de M. A. Franc pour la détermination des classes de validation qui sont géographiquement ciblées (uniquement dans les zones accessibles), mais qui ont l'avantage de couvrir l'ensemble des biotopes cartographiés.

Le tableau 10 présente les résultats issus des matrices de confusion que nous avons calculés pour chaque classification et résumés au travers de deux indicateurs : la précision globale et l'indice Kappa.

Tableau 10 - Kappa et précision globale des classifications

	Biotope synthétique		Formation végétale	
	Précision globale	Kappa	Précision globale	Kappa
1986	81,58%	0,7932	92,98%	0,8909
2004	82,09%	0,7805	86,57%	0,8041

La précision globale des classifications est au-delà de 80% au niveau des biotopes synthétiques et atteint même près de 93% pour les formations végétales en 1986. Ces résultats sont très satisfaisants et donnent une bonne confiance de la qualité des classifications. Toutefois, en analysant les résultats classe par classe (Annexe 2), nous observons des confusions entre les différents types de Savoka (savoka dense, savoka ouverte, savoka très ouverte). Ces résultats sont à prendre avec précaution. En effet, le nombre de point de validation n'est pas proportionnel aux superficies occupées par chaque classe. Avec en particulier un nombre de points de validation insuffisant pour les classes Savoka.

Ces classes de Savoka sont par nature des milieux fortement perturbés représentant des successions végétales en pleine évolution. Il y a certainement eu des confusions entre les classes elles mêmes, puisqu'en 1986, l'indice de kappa de la formation végétale « mixte » est assez élevé (0,769) alors que les indices de Savoka dense (0,38) et Savoka ouverte (0,36) sont bas.

Par contre en 2004, il y a eu des confusions avec les classes de forêt. La Savoka dense et la Savoka ouverte auraient été sous-représentées au profit de la forêt sur l'image de 2004.

Il n'a malheureusement pas été possible de relancer une nouvelle classification dans les délais impartis pour le stage.

#### **4.1.2. Analyse des classifications**

Les cartes des classifications des biotopes synthétiques et des formations végétales sont présentées sur les figures 6 à 9.

- **Carte des biotopes synthétiques**

La répartition surfacique des biotopes synthétiques présentée à la figure 10 montre que les savanes sont les biotopes principaux sur la zone d'étude en 1986 et 2004. Leur surface a fortement augmenté depuis 1986. De même la surface des Savoka très ouvertes augmente en 2004. Les superficies en culture semblent avoir diminuées significativement. Les zones forestières (forêt sèche et forêt galerie) diminuent aussi nettement.

- **Carte des formations végétales**

La carte des formations végétales (fig. 8 et 9), dont la répartition des superficies est présentée à la figure 11, montre globalement une diminution des formations forestières et des formations mixtes au profit des formations herbeuses qui augmentent sensiblement.



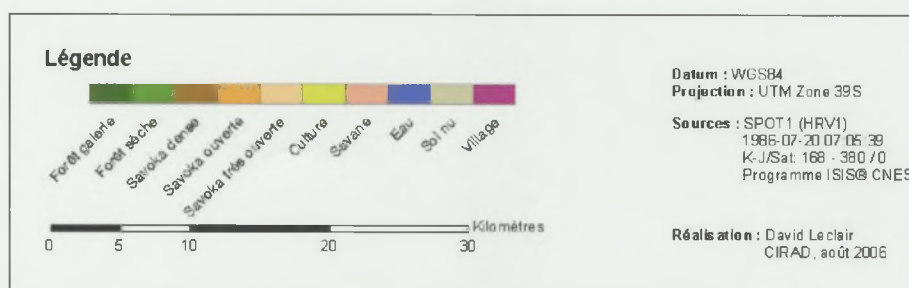
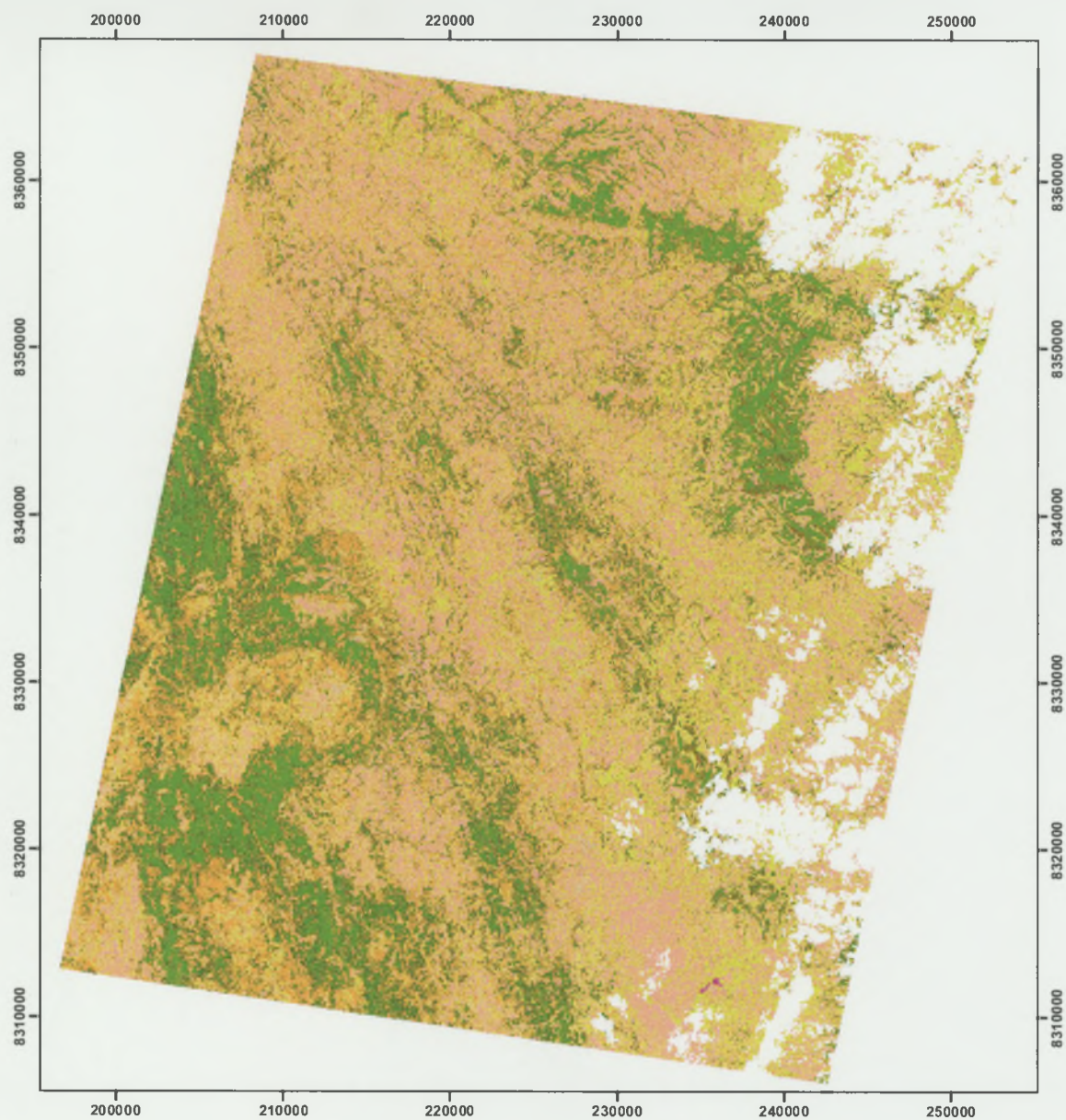


Fig. 6 - Carte des biotopes synthétiques en 1986

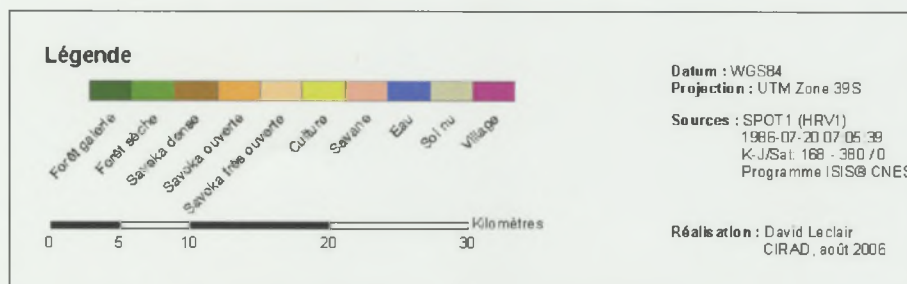
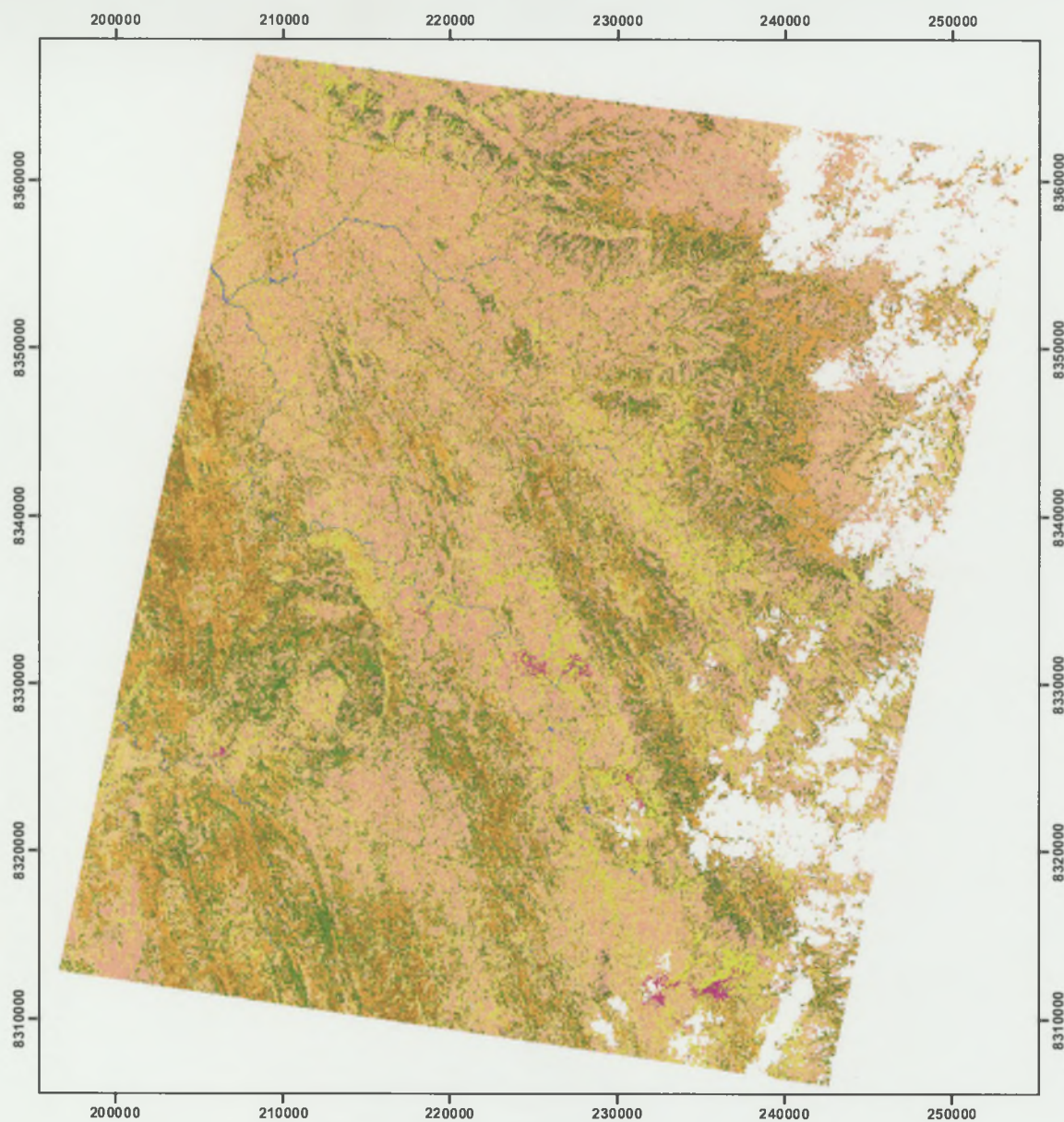


Fig. 7 - Carte des biotopes synthétiques en 2004



Entre 1986 et 2004, la déforestation est marquée à 2 niveaux. Tout d'abord au niveau de la surface globale, mais aussi au niveau de la structure des formations forestières. La superficie des parcelles de forêt s'effondre. Autrement dit, les entités forestières importantes disparaissent complètement (fig. 12). On assiste à un mitage du paysage. Parallèlement et logiquement, les formations mixtes prennent de plus en plus d'importance en surface et ont des parcelles homogènes vastes. La superficie des formations herbeuses s'étend aussi, ce qui confirme le processus de savanisation consécutif aux *tavy*.

Dans le détail, il n'existe quasiment aucune zone mixte en 1986 qui redevient de la forêt en 2004. Toutes les parcelles de forêt de 2004 l'étaient déjà en 1986. Seules de très rares zones de culture ou de friches sont passées en Savoka très ouverte, ce qui atteste localement d'un léger réembroussaillage. Mais l'essentiel du phénomène est inverse, on assiste à une ouverture du milieu.

La forêt Bora, pourtant déclarée réserve spéciale est complètement mitée. C'est aussi le cas de la partie sud-est de l'image et des contreforts cristallins orientaux du plateau de l'Ankazina où la forêt dominait nettement en 1986 et qui sont aujourd'hui défrichés. Quelle est la conséquence de ce mitage sur les déplacements du criquet ?

# Carte des formations végétales en 1986

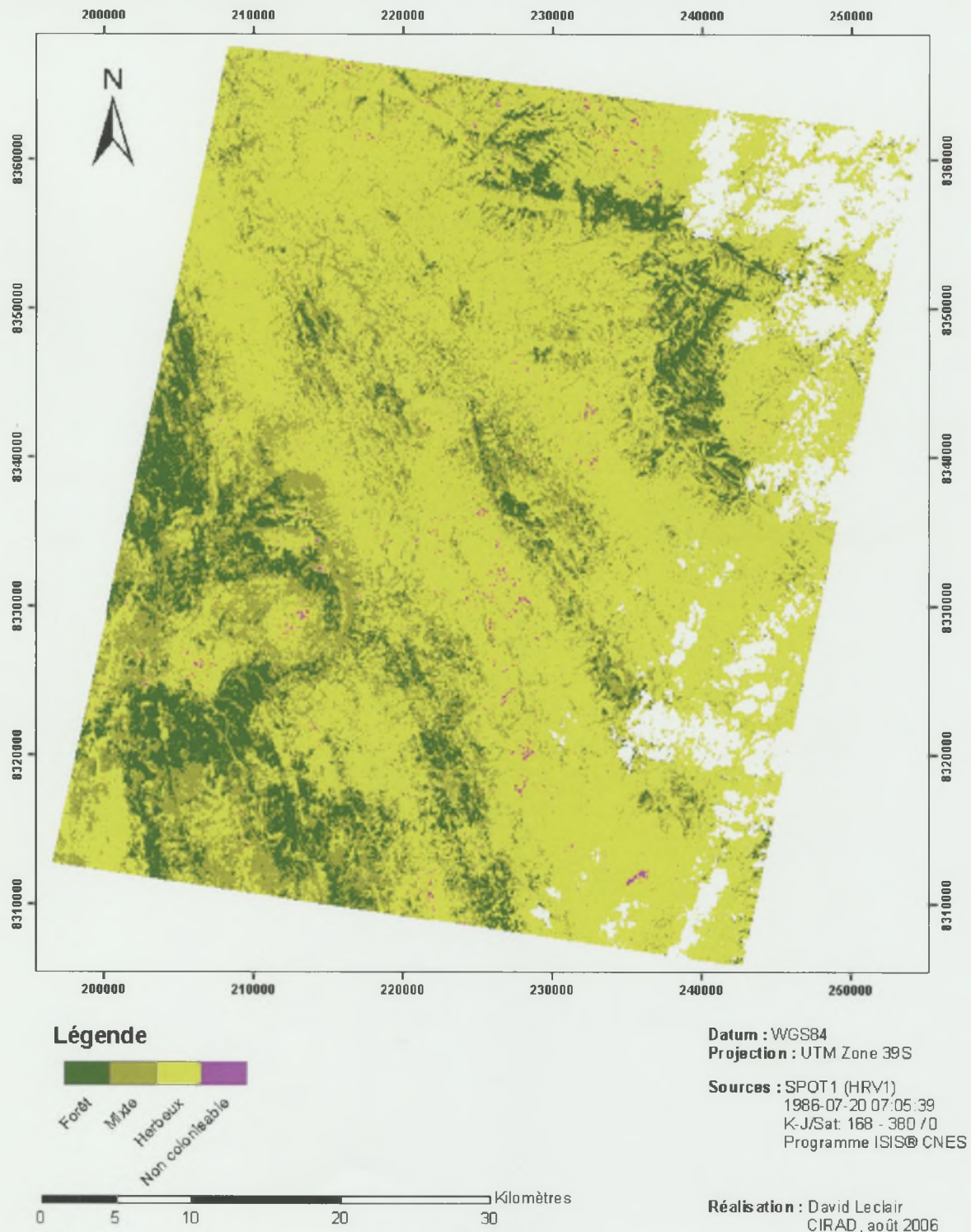


Fig. 8 - Carte des formations végétales en 1986



## Carte des formations végétales en 2004

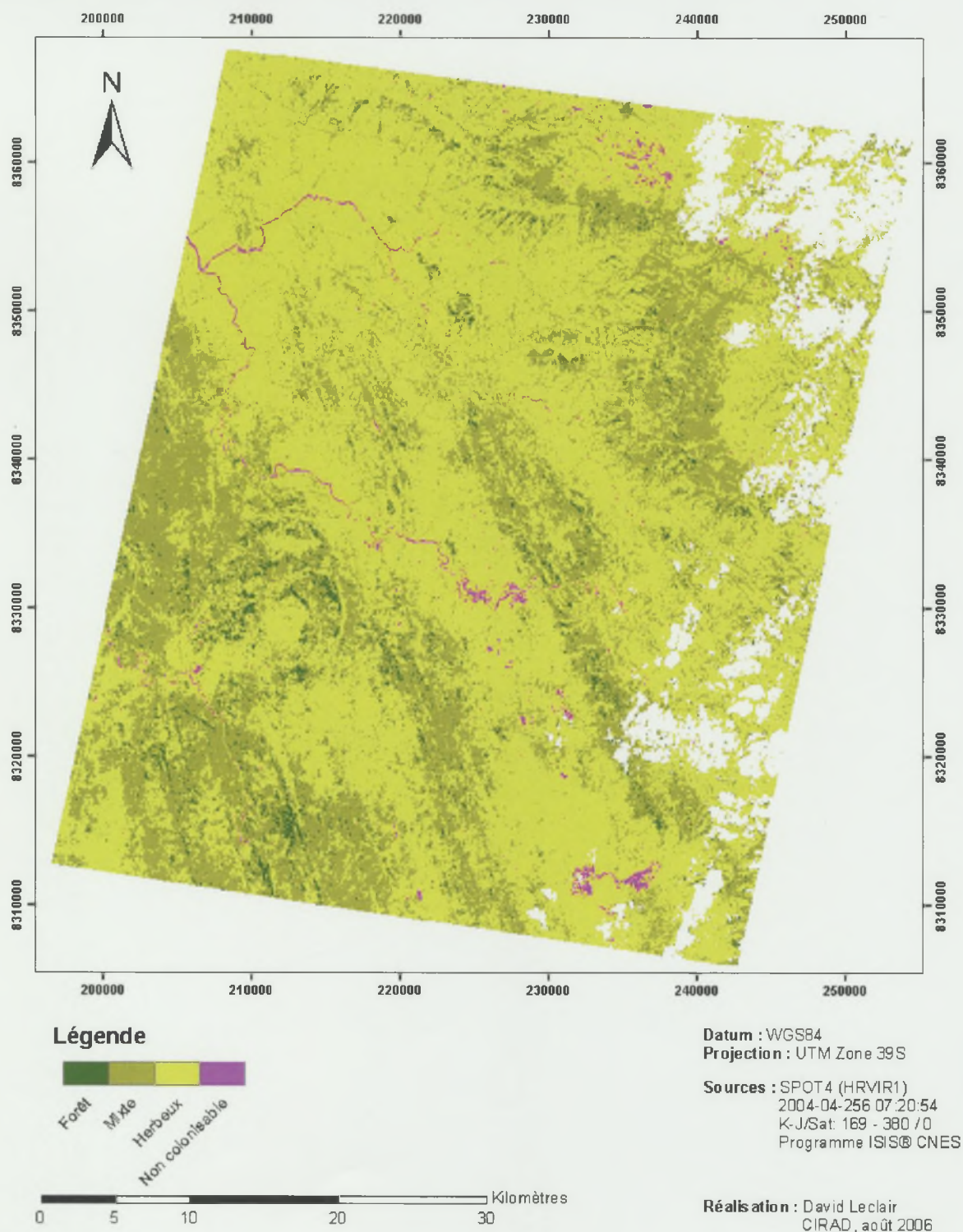


Fig. 9 - Carte des formations végétales en 2004

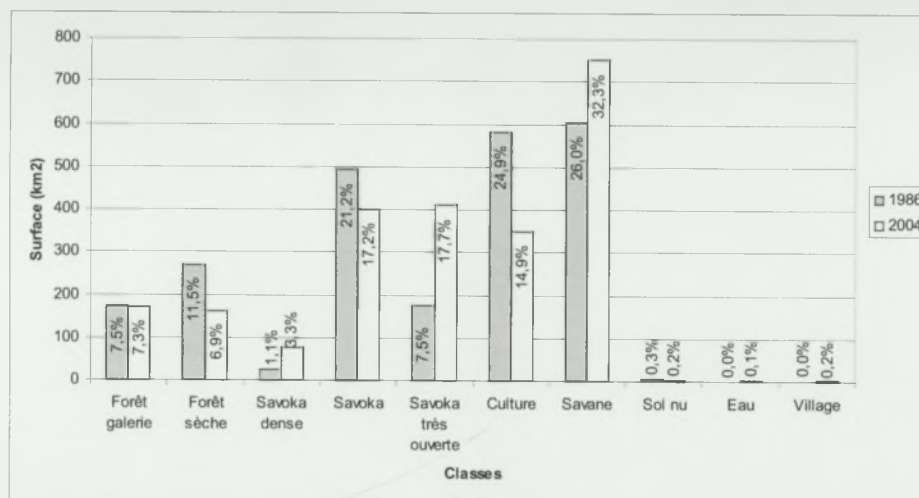


Fig. 10 - Répartition des classes de biotope synthétique entre 1986 et 2004

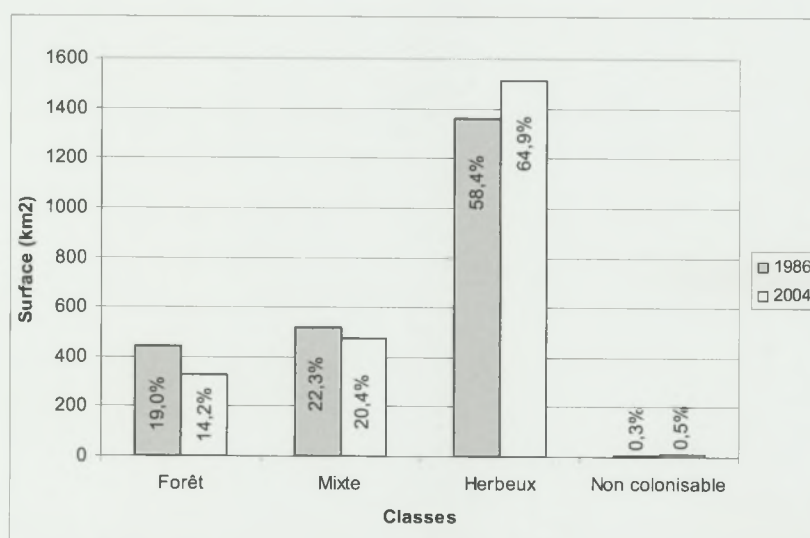


Fig. 11 - Répartition des classes de formation végétale en 1986 et 2004

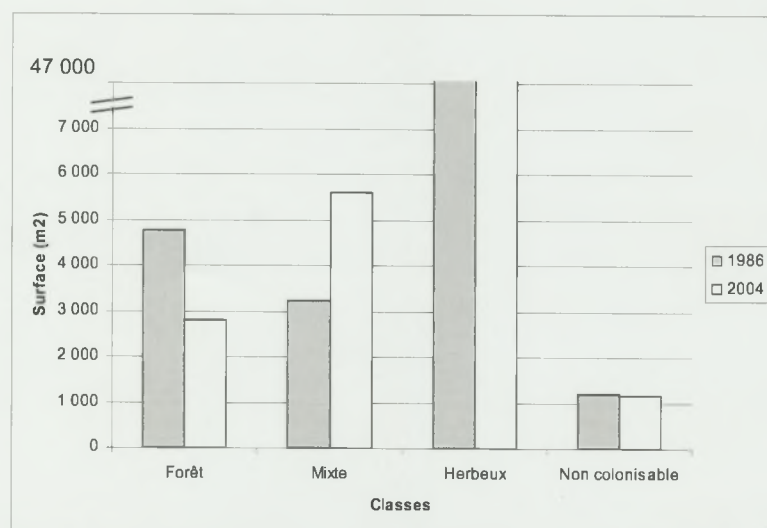


Fig. 12 - Superficie moyenne des parcelles de formation végétale entre 1986 et 2004



#### **4.2. Évolution du potentiel de déplacement**

Les voies de déplacement nouvelles et anciennes sont obtenues à l'issue du calcul du coût de déplacement de l'est vers l'ouest. La méthode d'estimation du coût de déplacement d'est en ouest de l'image montre clairement que le sud ouest de la zone était inaccessible en 1986. Les seules voies possibles étaient la traversée des grandes savanes centrales qui s'ouvraient sur les rives de l'Ankofia au nord ouest. Ces 3 voies majeures mènent toutes au nord d'Antsohihy dans les mêmes zones de reproduction. Par contre les zones de reproduction situées plus au sud (vallées de la Tsinjomorona et de la Doroa) étaient inaccessibles en 1986. Or, elles ont abrité des pullulations larvaires de grande ampleur en 2003 (Franc & Duranton, soumis). La voie de déplacement ouverte au sud du Mont Befandriana a joué un rôle majeur dans l'accessibilité des zones de ponte occidentales.

#### **4.3. Évolution du rôle du réseau hydrographique**

Les figures 13 et 14 présentent le rôle du réseau hydrographique sur le potentiel de déplacement du criquet. La partie nord du réseau hydrographique (bassin de l'Ankofia et de l'Anjinga) voit son rôle inchangé entre 1986 et 2004. Il traverse de grandes zones herbeuses et n'est pas très canalisateur du déplacement des criquets.

En revanche, les rivières plus au sud qui traversent les zones forestières jouent un rôle très différent entre 1986 et 2004. En 1986, la forêt galerie dominait autour du réseau hydrographique et masquait complètement le lit des rivières. En 2004, ces forêts galeries ont majoritairement disparu laissant place à des Savoka mixtes augmentant ainsi le rôle canalisateur des rivières. La déforestation renforce le rôle canalisateur de la rivière Tsinjomorona.

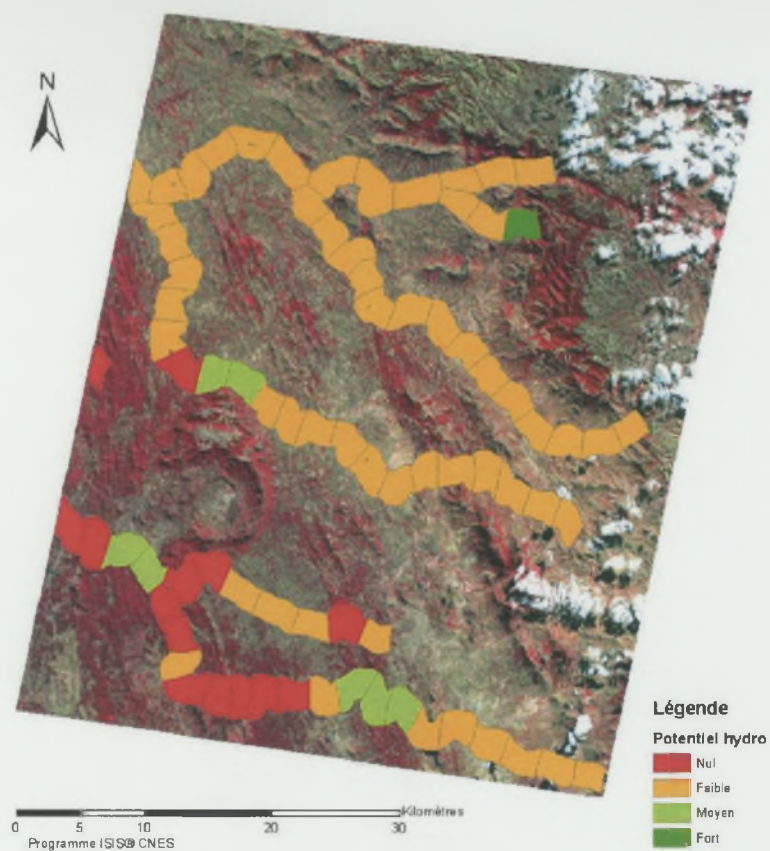


Fig. 13 - Carte du potentiel du réseau hydrographique en 1986

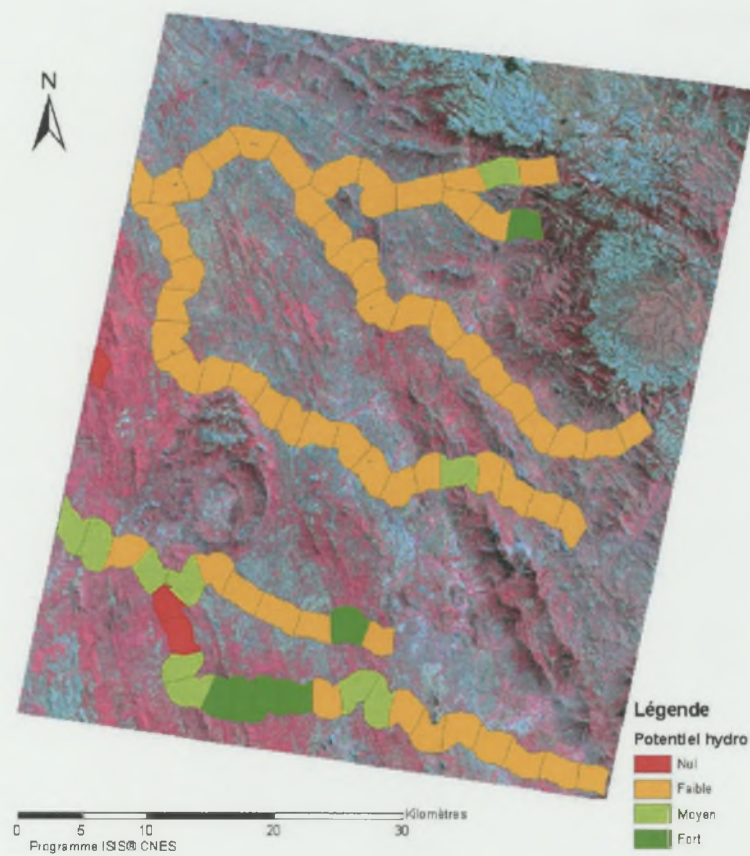
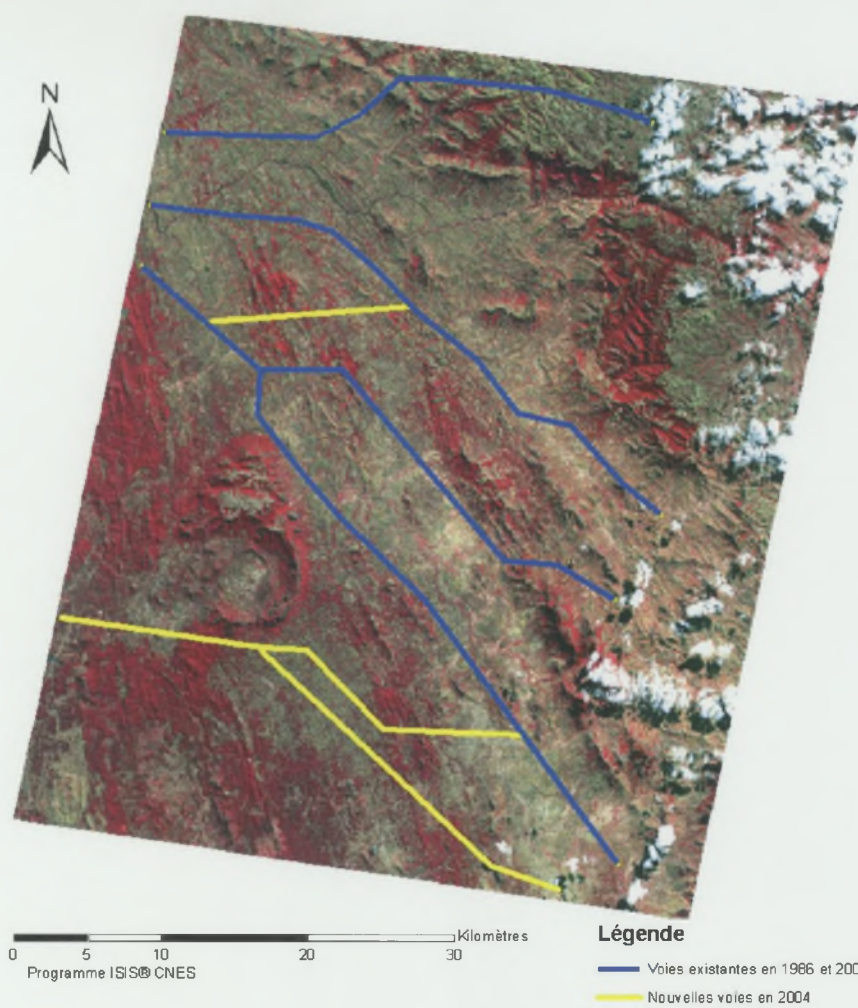


Fig. 14 - Carte du potentiel du réseau hydrographique en 2004





**Fig. 15 - Carte du potentiel de déplacement lié au réseau hydrographique**

#### **4.4. Les nouvelles voies privilégiées de déplacement**

La combinaison des cartes de potentiels de déplacement et celles liées au rôle du réseau hydrographique aux différentes dates, ont permis d'identifier les voies privilégiées de déplacement passées et actuelles dans notre zone d'étude. La figure 16 présente la carte de ces voies privilégiées. En 1986, 4 voies principales existaient, toutes étaient orientées vers le nord-ouest de la zone d'étude. En 2004, les anciennes voies sont toujours présentes, mais 3 nouvelles voies privilégiées de déplacement apparaissent au sud-ouest de la zone d'étude. Le grand massif forestier présent sur un axe nord-sud dans le sud-ouest de la zone d'étude, imperméable au passage du criquet nomade en 1986, a été suffisamment mité pour ouvrir de nouvelles voies privilégiées de déplacement.



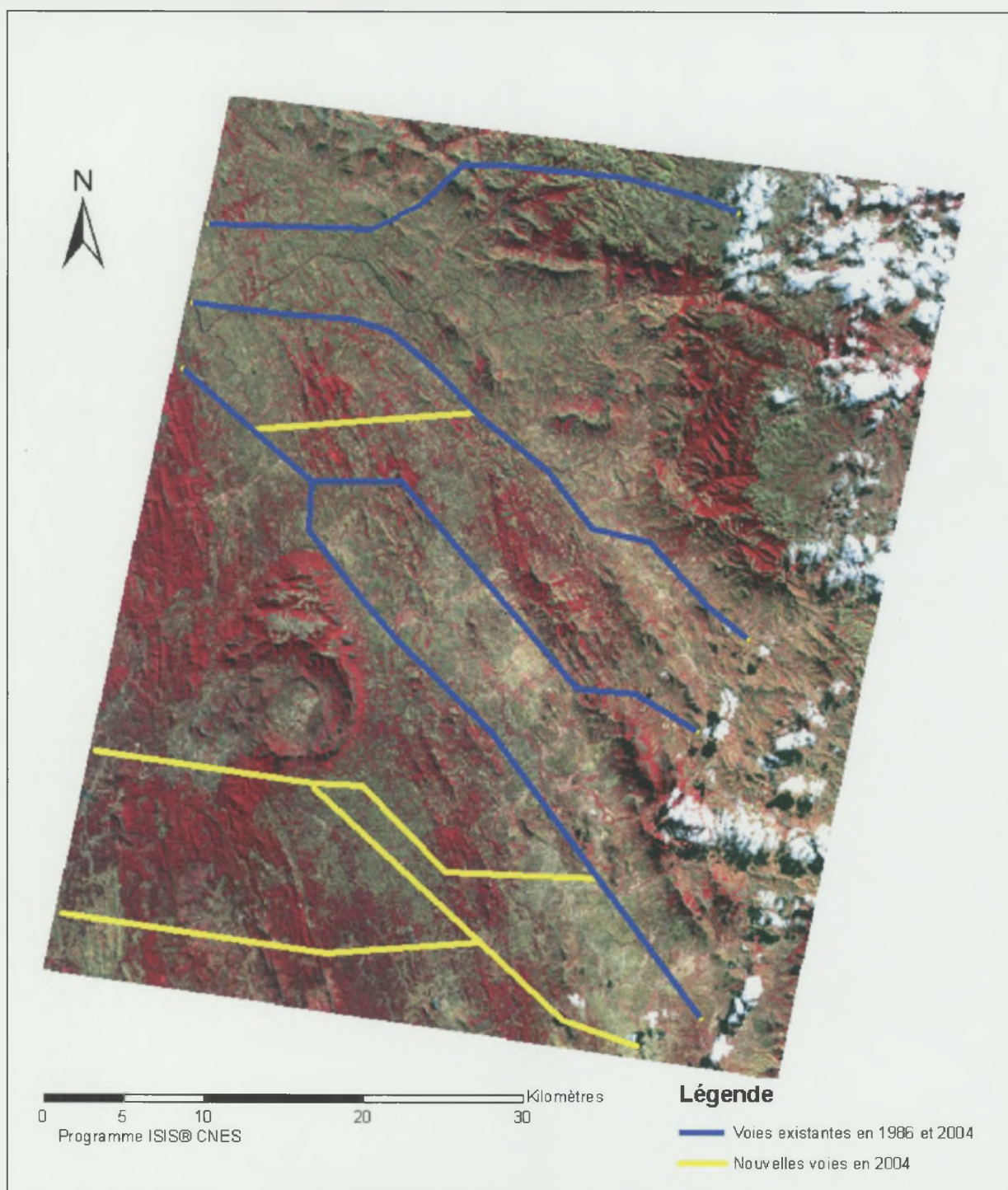


Fig. 16 - Carte des voies privilégiées de déplacement anciennes et actuelles

## 5. Discussion

Les traitements effectués à partir des images satellites SPOT au cours de cette étude diachronique ont permis d'extraire l'information nécessaire pour définir les anciennes et nouvelles voies privilégiées de déplacement. La méthodologie mise en place permet de limiter les erreurs dues à l'utilisation d'images ayant un post traitement limité. Les connaissances préalables du terrain ont été essentielles au succès de l'étude. Le choix des placettes d'entraînement et de validation a été possible grâce à cette expertise.

Dans cette étude, le niveau de détail des classifications obtenues a été limité par la qualité des images utilisées (résolution et bandes spectrales) qui ont restreint la capacité de photo interprétation. Ainsi, les biotopes élémentaires ont dû être regroupés en biotopes synthétiques lors des comparaisons pour assurer une bonne précision et simplifier le processus. Ceci est inévitable dans une analyse diachronique, la comparaison d'un trop grand nombre de classes devient vite impossible (Mas, 2000).

L'agglomération des pixels à une résolution de 500 mètres a permis une comparaison des 2 images dont la superposition n'était pas parfaite. L'amélioration du calage des images grâce à la prise de points GPS de terrain supplémentaires régulièrement répartis sur la zone aurait pu permettre de conserver la résolution à 20m.

Le nombre de sites d'évaluation utilisé pour valider la qualité des classifications n'était pas suffisant pour toutes les classes, ce qui ne permet pas de valider de façon précise la qualité des classifications pour certaines classes. Une acquisition de nouveaux sites d'évaluation, en particulier pour les classes de Savoka, permettrait de certifier la confiance de certaines classes dans les classifications.

L'ouverture de nouvelles voies de déplacement au sud annule l'effet d'ombrage que la forêt avait sur le sud-ouest de la zone. L'accès à cette nouvelle région permet ainsi au criquet nomade d'atteindre de nouvelles zones de ponte qui lui ont déjà permis de pulluler. Le passage à la phase grégaire observé récemment peut être partiellement expliqué par le développement de ces nouvelles voies privilégiées de déplacement.

La zone d'étude choisie ici est un concentré du bassin de la Sofia reliant des zones d'altitude propice à la diapause à des zones de plaines propices à la ponte. Mais le déplacement du criquet nomade se fait sur de grandes distances et le bassin de la Sofia s'étend sur plus de 50 000 km<sup>2</sup> ; un travail à une échelle plus petite serait tout à fait envisageable en utilisant des images à moyenne résolution qui couvriraient ainsi des zones plus vastes.

## Conclusion

La modification du couvert végétal entre 1986 et 2004 principalement par la pratique du *tavy*, a engendré une réduction des zones forestières et une augmentation des zones herbeuses. L'ouverture et le mitage du couvert végétal ont créé de nouvelles voies de déplacement pour le criquet nomade. Certains cours d'eau ont également augmenté leur potentiel de déplacement. Ces nouvelles voies créées ont comme principale conséquence de créer un nouveau passage vers le sud-ouest qui n'existait pas en 1986. Ce nouveau passage donne au criquet un accès à des zones favorables à la ponte.



Ce travail s'inscrit dans la thèse de M. Franc qui englobe l'impact de l'ensemble des transformations mésologiques sur la dynamique des populations du criquet nomade. La contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques a été essentielle à la réalisation de cette étude. Les images SPOT utilisées ont permis l'acquisition de l'information des biotopes. Cette dernière combinée à d'autres facteurs (pentes, réseau hydrographique) au sein d'un SIG a permis d'analyser spatialement et temporellement l'évolution des paysages et leur impact sur le potentiel du déplacement du criquet.

Par manque de temps, seules deux images satellites sur quatre ont été traitées pour réaliser l'analyse. Il est nécessaire de continuer ce travail sur les images restantes (1992 et 1999) pour évaluer le rythme et les périodes de changement d'occupation du sol.

## Références

- Andriamaroahina, T.**, 2005. - *Création d'un outil (SIG) pour le suivi et l'évaluation de la situation acridienne du Criquet migrateur malgache, Locusta migratoria capito (Saussure, 1884) dans une région pilote, la zone de Ejeda (Madagascar)*. ENGREF/AGRO/IGN/INA-PG : Montpellier, Paris (soutenance : 29/12/2005). - 41 p.
- Anonyme (Leica Geosystems)**, 2003. *ERDAS Field Guide<sup>TM</sup>*. GIS & Mapping : Atlanta (USA). - 7<sup>e</sup>Ed. + 672p.
- Aubert, S. & Razafiarison, S.**, 2003. - Culture sur brûlis et régression des surfaces boisées. IN : Aubert, S., Razafiarison, S. & Bertrand, A. (Ed. Sc.). - *Déforestation et systèmes agraires à Madagascar : Les dynamiques des tavy sur la côte orientale*. - Coll. Repères - CIRAD, CITE, FOFIFA : Montpellier (France) : 35-51.
- Chapman, R.F.**, 1959. Observations on the flight activity of the red locust, *Nomadacris septemfasciata* (Serville). - *Behaviour*, XIV(4) : 300- 334
- Chavez, P.S. & MacKinnon, D.J.**, 1994. Automatic detection of vegetation changes in the southwestern United States using remotely sensed images. - *Photogramm eng remote sens.*, 60(5) : 571- 582
- Cogalton, R.G.**, 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. - *Remote Sensing of Environment*, 37(7) : 35- 46
- Donque, G.**, 1975. *Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar*. [Nouvelle Imprimerie des Arts Graphiques] : Tananarive. VII + 478p.
- Duranton, J.-F., Launois, M., Launois-Luong, M.H. & Lecoq, M.**, 1979. Les voies privilégiées de déplacement du Criquet migrateur malgache en phase solitaire. - *Bull. , Ecol.*, 10(2) : 107- 123
- Duranton, J.-F., Launois-Luong, M.H., Launois, M. & Lecoq, M.**, 1982. *Manuel de prospection acridienne en zone tropicale sèche. I- De la théorie...II...à la pratique*. Ministère des Relations extérieures / Coopération et Développement / GERDAT : Paris / Montpellier (France). 1496p.
- Duranton, J.-F.**, 1996. *Expertise acridienne à Madagascar. Perspectives de réhabilitation du système d'avertissement antiacridien (11 mars - 17 avril 1996)*. - CIRAD-GERDAT-PRIFAS : Montpellier (France). VIII +52p.
- Farrow, R.A.**, 1990. - Flight and Migration in Acridoids. IN : Chapman, R.F. & Joern, A. (Ed. Sc.). - *Biology of Grasshoppers*. - Coll. A Wiley-Interscience Publication - John Wiley & Sons, Inc. Indianapolis, IN : 227-314.
- Franc, A. & Duranton, J.-F.**, 2001. *Rapport de mission dans le Nord de l'île. 11-17 novembre 2001*. - PCLA, Centre National Antiacridien / CIRAD-AMIS-PPC-Prifas : Tuléar (Madagascar) / Montpellier (France). 17p.
- Franc, A., Rabesisoa, L.F., Luong-Skovmand, M.H. & Lecoq, M.**, 2005. Phase polymorphism in the red locust *Nomadacris septemfasciata* (Orthoptera: Acrididae) in Madagascar. - *International Journal of Tropical Insect Science*, 25(3) : 182- 189
- Frappa, C.**, 1935. Etude sur la sauterelle migratrice *Nomadacris septemfasciata* Serv. et sa présence à Madagascar de 1926 à 1935. - *Bull. écon. Mad. (Nouv. sér.)*, 3 : 203- 221
- Frappa, C.**, 1947. La question acridienne à Madagascar. - *L'Agronomie Tropicale*, II(3-4) : 125- 149
- Gautier, L., Chatelain, C. & Spichiger, R.**, 1999. - Déforestation, altitude, pente et aires protégées : une analyse diachronique des défrichements sur les pourtours de la réserve spéciale de Manongarivo (NW de Madagascar). IN : Hurni, H. & Ramamonjisoa, J. (Ed. Sc.). - *African mountain development in a changing word*. - African Mountains Association : 255-279.



**Jensen, J.R.**, 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Coll. : Prentice-Hall Series in Geographic Information Science- Pearson Prentice Hall : New Jersey (USA). - 3<sup>e</sup>Ed. 526p.

**Leblanc, E.**, 2003. - *Enquêtes sur la biologie, l'écologie et les ravages de Nomadacris septemfasciata (Serville, 1838) dans le Nord de Madagascar*. Diplôme d'Agronomie Approfondie (Protection des Plantes et Environnement) - Projet de Contribution à la Lutte Antiacridienne/CIRAD-AMIS-Prifas/Centre national Antiacridien. - ENSAM, ENSAR, INA-PG + 32 p.

**Lecoq, M.**, 1975. - *Les déplacements par vol du Criquet migrateur malgache en phase solitaire : leur importance sur la dynamique des populations et la grégarisation*. Thèse de Doctorat d'Etat - Ministère de la Coopération. - Université de Paris, Faculté des Sciences d'Orsay + V + 245 p.

**Lecoq, M., Franc, A., Luong-Skovmand, M.H., Raveloson, A. & Ravelombony, V.d.P.**, 2006. Ecology and migration patterns of solitary Red locusts, *Nomadacris septemfasciata* (Serville) (Orthoptera: Acrididae) in Southwestern Madagascar. - *Annales de la Société Entomologique de France (Nouvelle Série)*, **42**(2) : 197-205

**Luong-Skovmand, M.H., Franc, A., Rabesisoa, L.F. & Lecoq, M.**, 2004. *Le Criquet nomade à Madagascar. Eléments de bibliographie*. - Centre National Antiacridien / CIRAD-AMIS-PPC-Prifas : Tuléar (Madagascar) / Montpellier (France).

**Mas, J.F.**, 2000. Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. - *Canadian Journal of Remote Sensing*, **26**(4) : 349- 362

**Nicoll, M.E. & Langrand, O.**, 1989. *Madagascar : Revue de la conservation et des aires protégées*. World Wide Fund for Nature : Gland (Suisse). xvii + 374p.

**Randrianasolo, E.**, 1978. - *Biologie et écologie comparées de deux acridiens (Orthoptera, Cyrtacanthacridinae) Cyrtacanthacris tatarica tatarica (Linn. 1758) et Nomadacris septemfasciata (Serville 1838) dans le Sud-Ouest de Madagascar*. Thèse d'Université -. - Université de Paris XI + V+189 p.

**Stow, D.A., Tinney, L.R. & Estes, J.E.**, 1980. - *Deriving land use/land cover change statistics from Landsat - A study of prime agricultural land* - International Symposium on Remote Sensing of Environment 14th, San Jose, Costa Rica, 23-30 Apr. 1980. p. 1227-1237.

**Têtefort, J.-P. & Wintrebert, D.**, 1967. Ecologie et comportement du Criquet nomade dans le Sud-Ouest malgache. - *Annales de la Société Entomologique de France (Nouvelle Série)*, **3**(1) : 3- 30

**Townshend, J.R.G., Justice, C.O., urney, C. & cManus, J.**, 1992. The impact of misregistration on change detection. - *Geoscience and Remote Sensing*, **30**(5) : 1054- 1060

## **Annexes**



***Annexe 1 – Images SPOT originales sélectionnées***

Image SPOT originale– 20 juillet 1986 (RVB : XS1-XS2-XS3)

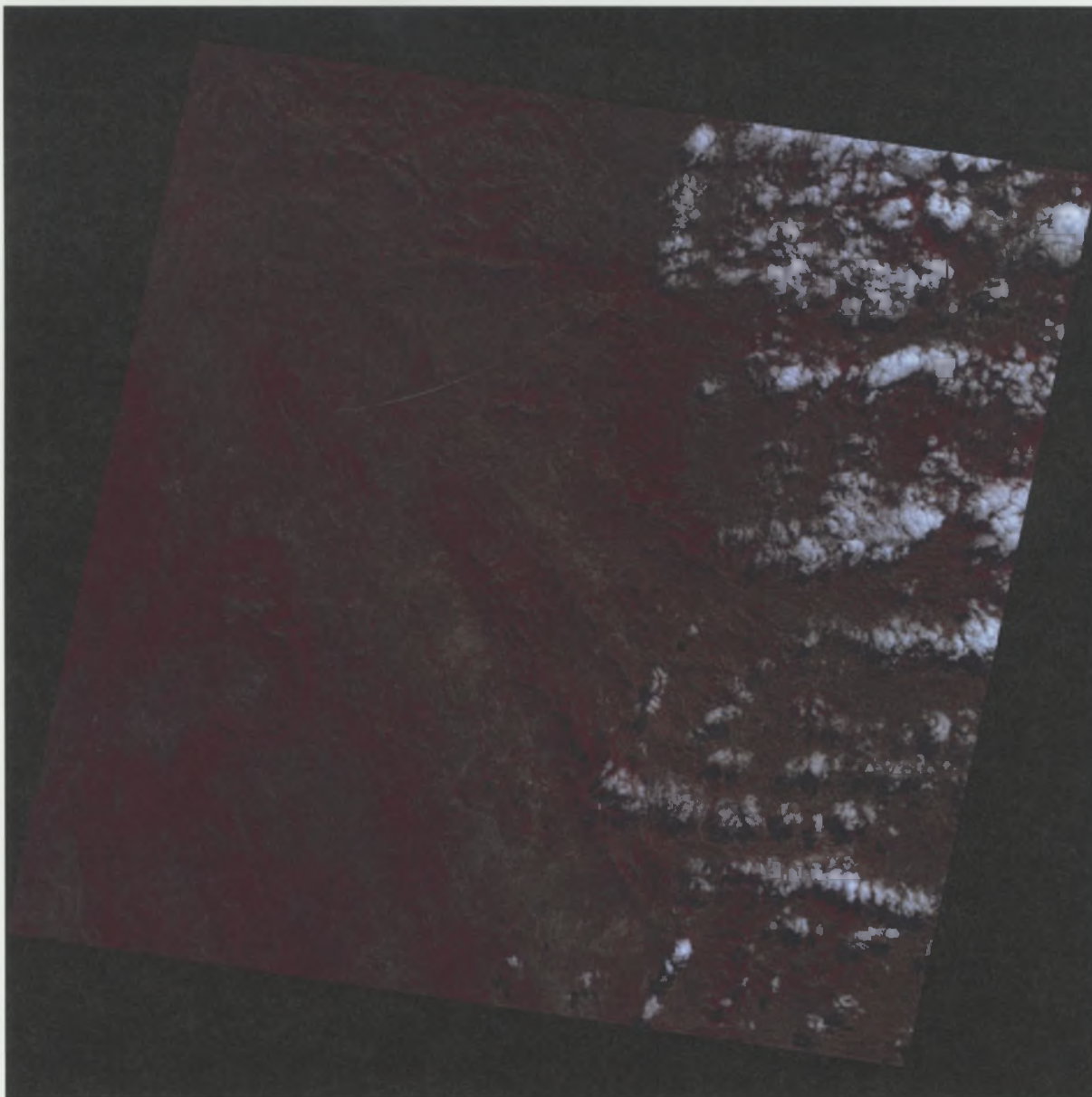
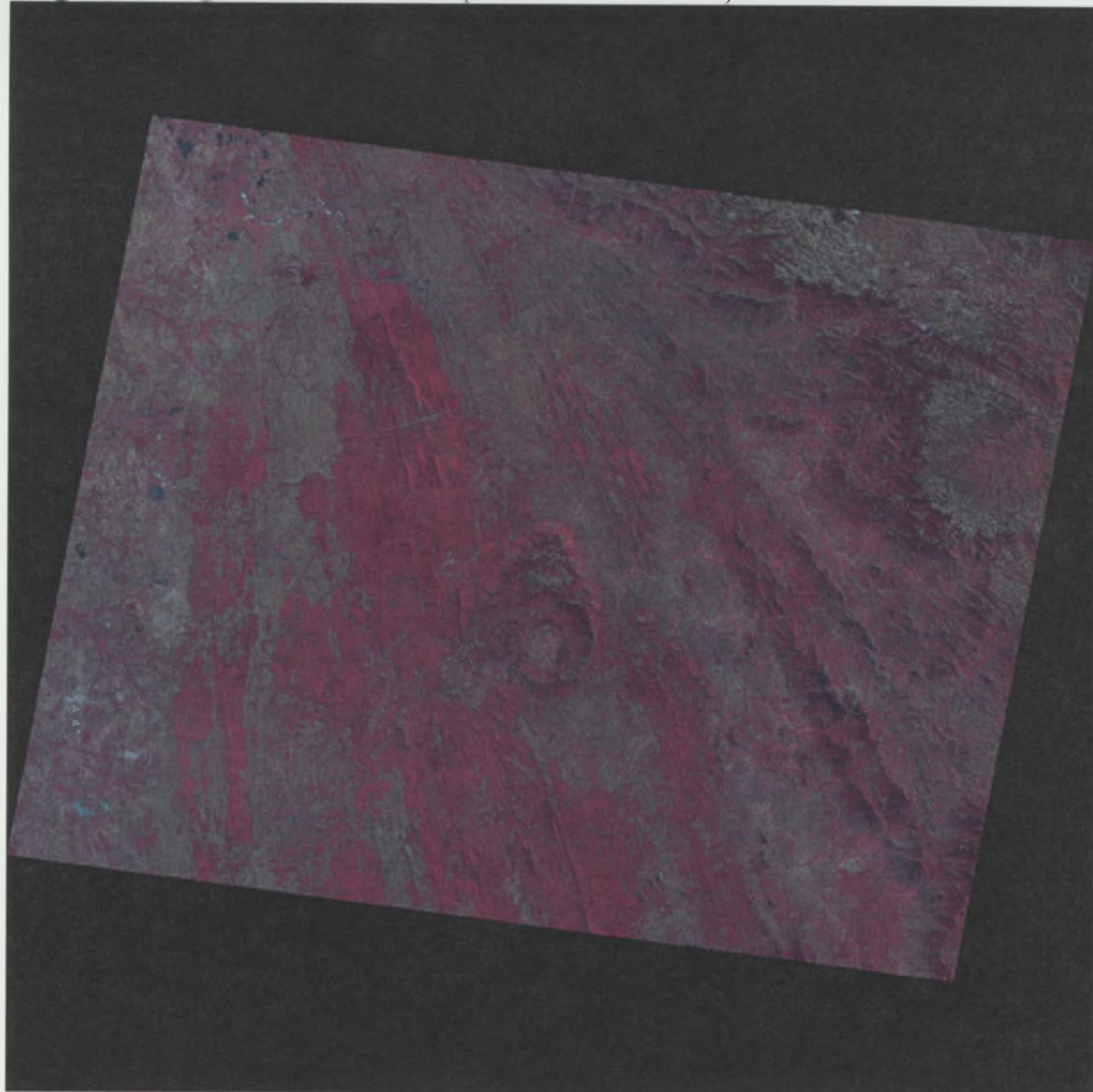




Image SPOT originale – 26 avril 2004 (RVB : XS1-XS2-XS3)



## ***Annexe 2 – Matrices d'erreur et Kappa des classifications***



## Matrice d'erreur et Kappa de la classification des biotopes synthétiques de l'image de 1986

Matrice d'erreur

		Référence										
	Classes	Forêt galerie	Forêt sèche	Culture	Savane	Savoka ouverte	Eau	Sol nu	Village	Savoka dense	Savoka tr ouverte	Total
Classifié	Forêt galerie	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
	Forêt sèche	4	20	0	0	1	0	0	0	1	0	26
	Culture	0	0	20	0	1	0	1	0	0	1	23
	Savane	0	0	3	21	0	0	0	0	0	0	24
	Savoka ouverte	4	0	0	0	7	0	0	0	2	0	13
	Eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sol nu	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
	Village	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Savoka dense	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6
	Savoka très ouverte	0	0	1	0	2	0	0	0	0	4	7
	Total	21	20	24	21	11	0	3	0	9	5	114

Précision globale

Classes	Totaux de référence	Totaux classifiés	Bien classé	Erreur de commission	Erreur d'omission
Forêt galerie	21	13	13	61.90%	100.00%
Forêt sèche	20	26	20	100.00%	76.92%
Culture	24	23	20	83.33%	86.96%
Savane	21	24	21	100.00%	87.50%
Savoka ouverte	11	13	7	63.64%	53.85%
Eau	0	0	0	---	---
Sol nu	3	2	2	66.67%	100.00%
Village	0	0	0	---	---
Savoka dense	9	6	6	66.67%	100.00%
Savoka très ouverte	5	7	4	80.00%	57.14%
Totaux	114	114	93		

Pourcentage de précision global :

81,58%

Kappa

Classes	Kappa
Forêt galerie	0,8782
Forêt sèche	0,7729
Culture	1,0000
Savane	0,9157
Savoka ouverte	0,3619
Eau	1,0000
Sol nu	1,0000
Village	0,0000
Savoka dense	0,3815
Savoka très ouverte	0,5442
Kappa global	0,7932

## Matrice d'erreur et Kappa de la classification des biotopes synthétiques de l'image de 2004

Matrice d'erreur

		Référence										
	Classes	Forêt galerie	Forêt sèche	Culture	Savane	Savoka ouverte	Eau	Sol nu	Village	Savoka dense	Savoka tr ouverte	Total
Classifié	Forêt galerie	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10
	Forêt sèche	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	Culture	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	9
	Savane	1	0	0	14	0	0	0	0	0	0	15
	Savoka ouverte	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	5
	Eau	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4
	Sol nu	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	7
	Village	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Savoka dense	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	5
	Savoka très ouverte	0	0	2	0	1	0	0	0	0	4	7
	Total	12	8	12	14	4	4	7	0	2	4	67

Précision globale

Classes	Totaux de référence	Totaux classifiés	Bien classé	Erreur de commission	Erreur d'omission
Forêt galerie	12	10	9	75,00%	90,00%
Forêt sèche	8	5	4	50,00%	80,00%
Culture	12	9	9	75,00%	100,00%
Savane	14	15	14	100,00%	93,33%
Savoka ouverte	4	5	2	50,00%	40,00%
Eau	4	4	4	100,00%	100,00%
Sol nu	7	7	7	100,00%	100,00%
Village	0	0	0	---	---
Savoka dense	2	5	2	100,00%	40,00%
Savoka très ouverte	4	7	4	100,00%	57,14%
Totaux	67	67	55		

Pourcentage de précision global : 82,09%

Kappa

Classes	Kappa
Forêt galerie	1,0000
Forêt sèche	0,7201
Culture	0,8348
Savane	0,8468
Savoka ouverte	0,4892
Eau	0,0000
Sol nu	1,0000
Village	0,0000
Savoka dense	1,0000
Savoka très ouverte	0,5518
Kappa global	0,7805



## Matrice d'erreur et Kappa de la classification des formations végétales de l'image de 1986

Matrice d'erreur						
Classifié	Classes	Référence				Total
		Forêt	Mixte	Herbeux	NC	
	Forêt	37	1	0	0	38
	Mixte	4	17	0	0	21
	Herbeux	0	2	50	1	53
	Non colonisable	0	0	0	2	2
	Total	41	20	50	3	114

### Précision globale

Classes	Totaux de référence	Totaux classifiés	Bien classé	Erreur de commission	Erreur d'omission
Forêt	41	38	37	90,24%	97,37%
Mixte	20	21	17	85,00%	80,95%
Herbeux	50	53	50	100,00%	94,34%
Non colonisable	3	2	2	66,67%	100,00%
Totaux	114	114	106		
Pourcentage de précision global :			92,98%		

### Kappa

Classes	Kappa
Forêt	0,9589
Mixte	0,7690
Herbeux	0,8992
Non colonisable	1,0000
Kappa global	0,891

## Matrice d'erreur et Kappa de la classification des formations végétales de l'image de 2004

Matrice d'erreur						
Classifié	Classes	Référence				Total
		Forêt	Mixte	Herbeux	NC	
	Forêt	14	1	0	0	15
	Mixte	5	4	1	0	10
	Herbeux	1	1	29	0	31
	Non colonisable	0	0	0	11	11
	Total	20	6	30	11	67

### Précision globale

Classes	Totaux de référence	Totaux classifiés	Bien classé	Erreur de commission	Erreur d'omission
Forêt	20	15	14	70,00%	93,33%
Mixte	6	10	4	66,67%	40,00%
Herbeux	30	31	29	96,67%	93,55%
Non colonisable	11	11	11	100,00%	100,00%
Totaux	67	67	58		
Pourcentage de précision global :			86,57%		

### Kappa

Classes	Kappa
Forêt	0,9050
Mixte	0,3410
Herbeux	0,8832
Non colonisable	1,0000
Kappa global	0,804